

Trabajo Fin de Grado

Análisis de las necesidades energéticas para la
implantación de autobús eléctrico en entornos
urbanos

Autor

Héctor Díaz Otero

Director

Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Año 2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Héctor Díaz Otero,

con nº de DNI 73004831-W en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado en ingeniería de tecnologías industriales, (Título del Trabajo)

Análisis de las necesidades energéticas para la implantación de autobús
eléctrico en entornos urbanos

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 15 de junio de 2015

Fdo: Héctor Díaz Otero

Análisis de las necesidades energéticas para la implantación de autobús eléctrico en entornos urbanos

RESUMEN DEL PROYECTO

El principal obstáculo del vehículo eléctrico es la autonomía que hoy en día ofrecen sus baterías. En el caso particular del uso de tracción eléctrica en medios de transporte públicos, las baterías han de diseñarse de forma que tengan capacidad suficiente para soportar una jornada de trabajo. El objetivo del presente proyecto consiste en el desarrollo de un modelo que nos ayude a comprender el funcionamiento de las distintas partes de un autobús eléctrico, pudiendo dimensionar correctamente sus baterías en función del consumo energético de cada recorrido, pero dando al mismo tiempo un método general para abordar con éxito cualquier situación que pudiera ser planteada.

El trabajo se compone de las siguientes fases:

- Registro vía GPS de tramos realizados por autobuses urbanos en Zaragoza, con el fin de obtener una muestra representativa de las características del recorrido así como del estilo de conducción.
- Implementación del modelo mediante la elección y diseño de los diferentes componentes que integran un autobús eléctrico: motor-reductor, convertidor de potencia bidireccional, control de velocidad, tecnología para el almacenamiento de la energía, etc.
- Cálculo final de los parámetros de la batería en distintos escenarios planteados. Se incluirán los nuevos avances en carga rápida al final de cada trayecto, gracias a los cuales podremos reducir el tamaño de la batería de forma considerable.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	5
2. Autobuses eléctricos del mercado / Mercedes-Benz Citaro.....	7
3. Registro del entorno zaragozano	12
4. Modelo dinámico	16
5. Motor eléctrico.....	21
5.1 Tipos de motor para vehículo eléctrico	23
5.2 Selección del motor	26
5.3 Ajuste del modelo	28
6. Convertidor de potencia	30
6.1 Funcionamiento del chopper de dos cuadrantes	31
6.2 Tipos de transistores	32
6.3 Modelado del convertidor.....	33
7. Controlador	34
7.1 El regulador PI.....	34
7.2 Cálculo del regulador.....	35
7.3 Validez del regulador.....	37
8. El ciclo urbano	39
8.1 Análisis del ciclo	39
8.2 Sistema de carga rápida de Volvo	41
9. Baterías	42
9.1 Parámetros de las baterías	42
9.2 Tecnologías para el almacenamiento de la energía	43
9.3 Modelado de la batería	45
9.4 Cálculo de la capacidad	46
9.5 Batería Calb CAM72F.....	47
9.6 Otros casos estudiados.....	48
10. Conclusiones	50
Bibliografía.....	51

1. Introducción

Debido al aumento progresivo de la población mundial, vivimos un periodo donde las necesidades de transporte son cada vez más importantes.

Por otro lado, el mantenimiento de un transporte basado en combustibles fósiles genera una contaminación que se hace cada vez más evidente en nuestro entorno.

Ante esta situación, un mayor número de ciudades se interesan por incorporar vehículos de tracción eléctrica en su sistema de transporte público.

Y es que un vehículo eléctrico posee importantes ventajas:

- Es más eficiente
- Produce menor contaminación y es más silencioso
- Requiere menor mantenimiento
- Es más sencillo de conducir

Todo vehículo eléctrico se compone de las siguientes partes:

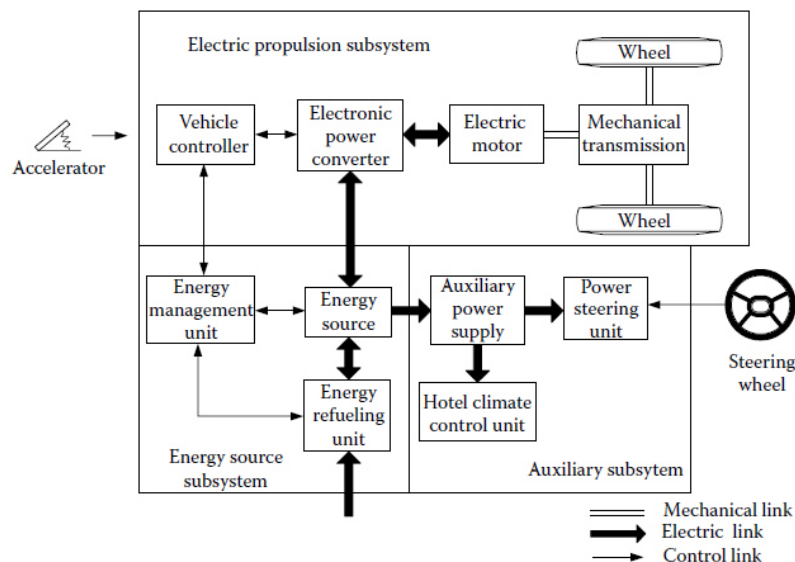


Figura 1.1 Esquema de un vehículo eléctrico
(fuente: *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*)

En este proyecto se trabajará cada una de las partes por separado, hasta completar el modelo del autobús eléctrico según se muestra en la siguiente página.

En un primer paso se construirá el modelo del comportamiento dinámico del autobús. Utilizando los tramos registrados en GPS podremos seleccionar un motor-reductor que se adecue a las características del recorrido. El controlador será el encargado de gestionar el tránsito de corriente entre la batería y el motor. El tipo de convertidor de potencia utilizado permite la recuperación de energía en las frenadas.

Finalmente obtendremos las necesidades energéticas para un recorrido estandarizado, teniendo en cuenta que la recarga de las baterías se llevará a cabo con un sistema de carga rápida al final de cada trayecto; aunque también se plantearán otros escenarios de funcionamiento.

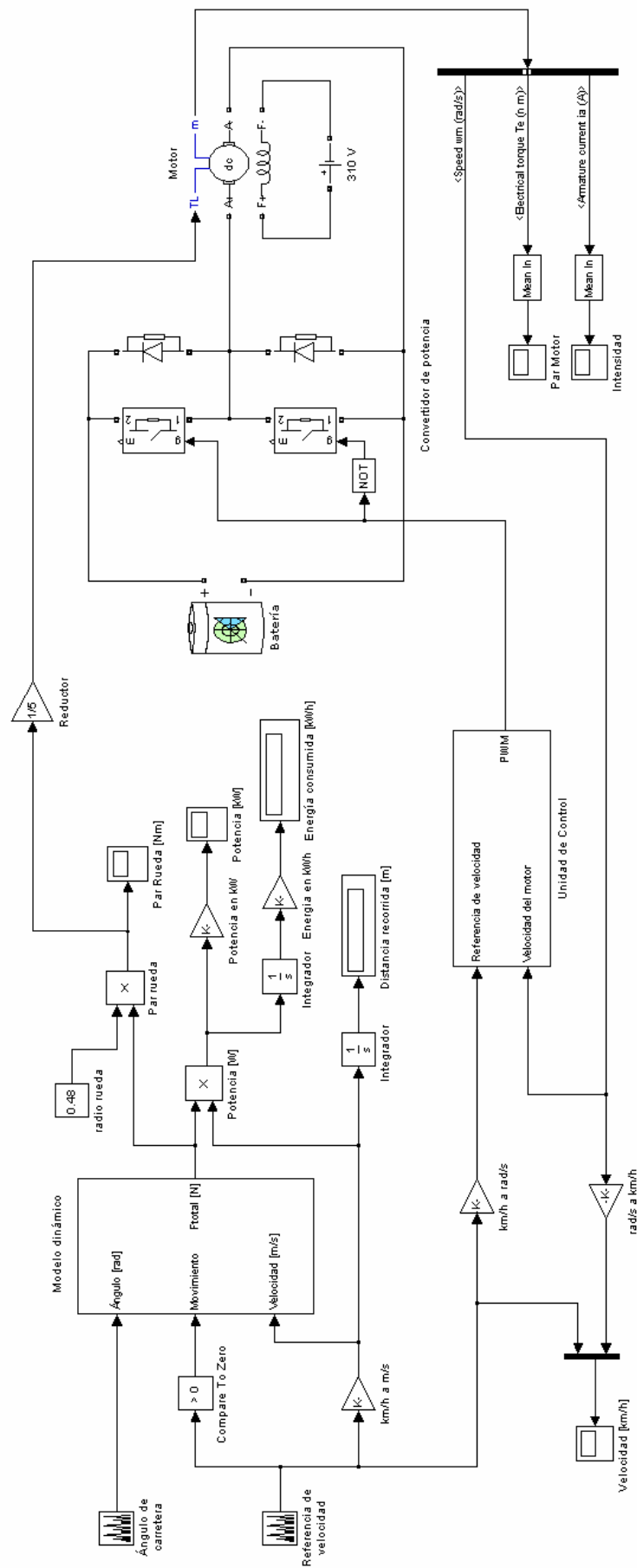


Figura 1.2 Modelo completo del autobús eléctrico (Software utilizado: MATLAB R2008a)

2. Autobuses eléctricos del mercado / Mercedes-Benz Citaro

Antes de comenzar con el proceso de elaboración del modelo, es útil tener una breve descripción de los principales autobuses eléctricos disponibles en el mercado. También se incluyen las principales características del Mercedes-Benz Citaro, autobús utilizado en el registro de los tramos en GPS.

BYD eBus

Se trata de un autobús fabricado en China cuya capacidad para pasajeros se configura en función de las necesidades del cliente (la versión de tres puertas permite el transporte de 68 pasajeros, 26 de ellos sentados); además dispone de plataforma de piso bajo y rampa para acceso de sillas de ruedas. Este modelo de 12 metros de longitud pesa 13,5 toneladas y es capaz de superar pendientes de hasta el 15%.

Está propulsado por dos motores síncronos de imanes permanentes con una potencia máxima de 90 kilovatios a un par de 350 Newton-metro cada uno. Estos motores están integrados en las ruedas traseras (lo que se conoce como motores en rueda o wheel-hub motors) y permiten al vehículo alcanzar una velocidad máxima de 70 kilómetros por hora.

Posee un paquete de baterías de tipo litio-ferrofosfato (LiFePO_4) que puede estar distribuido físicamente de diversas formas en función del carrozado (aunque la disposición más habitual es sobre las columnas de las ruedas). Además de permitir la recuperación de energía durante el frenado (frenado regenerativo), este modelo incluye paneles solares instalados en el techo que aportan energía adicional. El paquete de baterías es de 324 kilovatios-hora (600 Amperios-hora de capacidad) y se recarga completamente en 5,5 horas ofreciendo una autonomía que ronda los 260 kilómetros.

Las pruebas de conducción que fueron realizadas en Holanda dieron como resultado un consumo medio real de 1,25 kilovatios-hora por kilómetro.



Figura 2.1 Autobús eléctrico BYD utilizado por las empresas de transporte EMT (Madrid) y TMB (Barcelona) durante un periodo de pruebas en 2012

Irizar i2e

El autobús eléctrico i2e del grupo vasco Irizar es un proyecto que arrancó en 2011 y que tres años después ya circula en pruebas realizadas en San Sebastián y Barcelona dentro del programa europeo ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System) para la implantación de autobuses eléctricos en las principales ciudades de Europa.

Como innovación, el autobús de Irizar posee una estructura atornillada de aluminio que, además de contribuir a la reducción del peso, está concebida para soportar con garantía situaciones de choque lateral o frontal, así como para evitar el vuelco lateral. Su peso en vacío es de 14,8 toneladas y tiene capacidad para 76 pasajeros (24 de ellos sentados).

Cuenta con un motor tipo síncrono fabricado por Siemens con una potencia nominal de 180 kilovatios y un par de 1.400 Newton-metro, lo que le permite superar pendientes de hasta un 18%.

Por su parte, la batería de 376 kilovatios-hora (con un voltaje nominal de 650 voltios) está formada por celdas de sodio-níquel, una tecnología de menor coste que el litio-ion y reciclable en un 99%. Además el sistema integra supercondensadores que, al igual que las baterías, están instalados en el techo del autobús.

El sistema de almacenamiento energético gestiona la relación entre la batería y los supercondensadores para mantener el estado de la carga en un rango óptimo, lo que permite alargar el ciclo de vida de la batería, cuya vida útil se estima en torno a los 600.000 kilómetros.

Para la recarga serán necesarias unas 5 horas mediante una toma Combo2 a 125 amperios. El Irizar i2e ofrece una autonomía que varía entre 200 y 250 kilómetros dependiendo del ciclo de conducción y de las condiciones climatológicas.

Según su fabricante, por cada autobús eléctrico se reducen las emisiones anuales de CO₂ en 88 toneladas y se ahorran 33.000 litros de combustible.



Figura 2.2 Autobús eléctrico Irizar i2e

Foton BJ6123EVCA

Este autobús fabricado en Pekín por la empresa Foton Motor tiene una capacidad para 63 plazas (27 asientos), dispone de plataforma de piso bajo para facilitar el acceso a personas mayores y ofrece la posibilidad de acceso a silla de ruedas por su sistema de rampa. El peso del autobús en vacío es de 13,2 toneladas.

Dispone de un motor eléctrico con una potencia nominal de 115 kilovatios (y una potencia pico de 150 kilovatios) permitiendo alcanzar velocidades máximas de 80 kilómetros por hora.

La energía procede de un pack de baterías de litio-manganeso de 120 kilovatios-hora que proporciona una autonomía de entre 110 y 130 kilómetros con cada carga. Además estas baterías cuentan con una característica destacable: son extraíbles y están preparadas para que su cambio pueda ejecutarse en 10 minutos; o bien pueden recargarse dentro del propio vehículo.

El autobús eléctrico Foton fue probado durante 2011 en las localidades navarras de Pamplona y Tafalla, y posteriormente en 2012 también en Madrid.



Figura 2.3 Autobús eléctrico Foton en la plaza del Ayuntamiento de Tafalla

Solaris Urbino 12

El Solaris Urbino 12 es un autobús eléctrico fabricado por la empresa de origen polaco Solaris Bus & Coach. Fue presentado oficialmente en la ciudad alemana de Braunschweig a mediados de 2014, donde se realizaron las pruebas del sistema de carga inductiva que incorpora este modelo. Ya en 2015, tanto Varsovia, capital de Polonia, como Hannover, en Alemania, realizan encargos para incluir este autobús eléctrico en sus flotas. La empresa de transportes de Barcelona (TMB) también ha firmado un acuerdo con la compañía Solaris, pero en este caso para la adquisición del modelo articulado de 18 metros.

En lo referente al sistema de tracción, el Urbino 12 ofrece dos alternativas: o bien un motor central asíncrono de 160 kilovatios de potencia máxima, o bien dos motores en rueda de 60 kilovatios cada uno.

El pack de baterías de litio con el que va equipado es de 200 kilovatios-hora. Para proceder a su carga se ofrecen varias posibilidades. En carga lenta, el uso de una conexión de enchufe convencional permite recargar las baterías en unas 4 horas.

Si se desea además incluir un sistema de carga rápida, se podrá optar entre instalar un pantógrafo en su techo, o bien utilizar el sistema de carga inductiva mencionado anteriormente.



Figura 2.4 Autobús eléctrico Solaris Urbino 12

Mercedes-Benz Citaro

De entre los 312 autobuses urbanos que componen la flota de la empresa de transportes Urbanos de Zaragoza, el modelo Mercedes-Benz Citaro es el mayormente utilizado con un total de 69 unidades.



Figura 2.5 Autobús Mercedes-Benz Citaro utilizado en Zaragoza

Sus principales especificaciones son las siguientes:

Longitud	12 m	Neumáticos	275/70 R 22,5
Anchura	2,55 m	Nº de asientos	28
Altura	3,12 m	Capacidad del depósito de combustible	280 litros
Peso	10.950 kg	Capacidad del depósito de AdBlue ¹	38 litros

Tabla 2.1 Especificaciones del Mercedes-Benz Citaro

¹ El AdBlue® es un aditivo utilizado para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno causadas por los motores diesel.

Está equipado con un motor Mercedes-Benz OM 906 hLA que tiene una potencia de 210 kilovatios y un par máximo de 1.120 Newton-metro. Su peso es de 800 kilogramos.

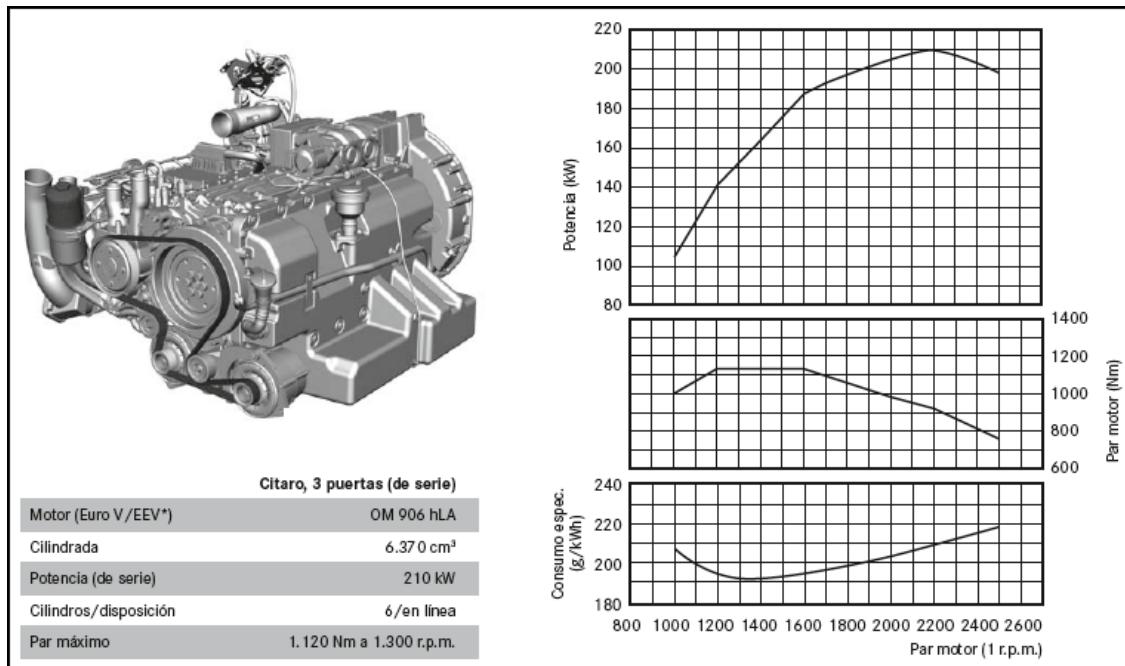


Figura 2.6 Especificaciones del motor Mercedes-Benz OM 906 hLA
(fuente: catálogo del Mercedes-Benz Citaro)

Dispone además de una caja de cambios automática ZF Ecolife de 6 velocidades cuyo peso se señala a continuación:

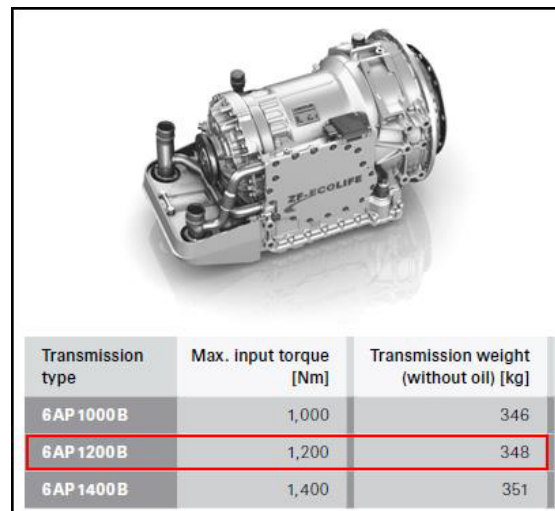


Figura 2.7 Transmisión ZF Ecolife (fuente: catálogo de ZF)

3. Registro del entorno zaragozano

Con el fin de obtener perfiles de velocidad y altitud para el posterior dimensionado del motor se procedió al registro GPS de dos tramos diferentes: uno urbano, caracterizado por un mayor número de interrupciones (paradas en marquesinas, pasos de cebra, semáforos, etc.), y otro interurbano, con un recorrido más fluido en el que se alcanzan mayores velocidades. De este modo quedan representadas las dos situaciones de conducción en las que operan los autobuses de Zaragoza.

Para ello se ha hecho uso de *My Tracks*, una aplicación para Android desarrollada por Google Inc. Las muestras fueron tomadas un viernes laborable en horarios de 8 a 12h, a bordo del Mercedes-Benz Citaro descrito anteriormente.

Tramo urbano: Calle Rioja - Camino las Torres (Circular 2)



Figura 3.1 Recorrido del tramo urbano

Tramo interurbano: Zaragoza - Utebo

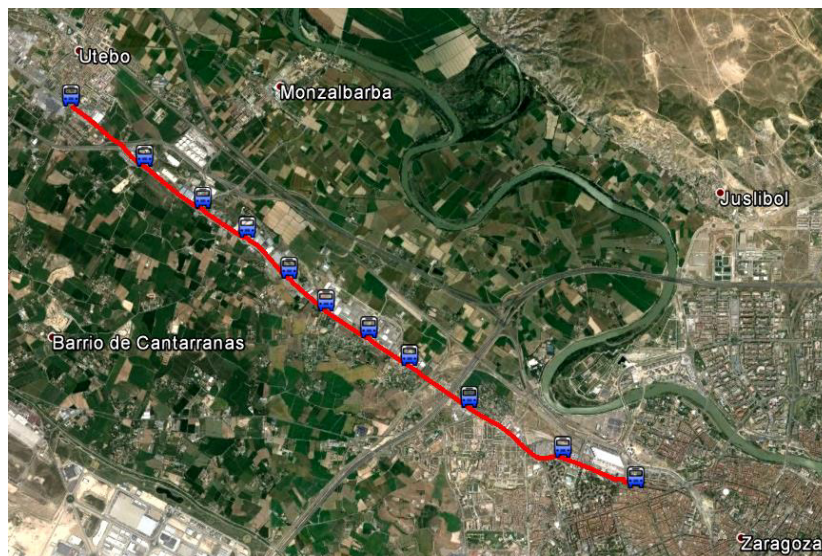


Figura 3.2 Recorrido del tramo interurbano

La aplicación genera un archivo en formato gpx² que contiene la información del conjunto de waypoints³ registrados durante el trayecto.

	Tramo urbano	Tramo interurbano
Tiempo	24min 29s (1469s)	16min 13s (973s)
Distancia	5,47 km	9,57 km
Velocidad media	13,4 km/h	35,4 km/h
Nº de marquesinas	17	11

Tabla 3.1 Características de ambos tramos

Para la etapa de postproceso se ha hecho uso del software *TCX Converter*, el cual incorpora al archivo los datos referentes a la altitud de cada punto. El software permite además volcar en columnas de una tabla Excel la información contenida en el archivo: localización geográfica (latitud y longitud) de la sucesión de puntos registrados, hora en la que fueron tomados y distancia recorrida.

A partir de aquí podemos utilizar columnas contiguas para realizar los cálculos de velocidad instantánea y pendiente del recorrido. También se han incluido columnas para la aceleración y el ángulo de la carretera.

tiempo (s)	distancia (km)	altitud (m)	altitud modificada	Δt (s)	$\Delta dist$ (km)	velocidad (km/h)	Δvel (km/h)	aceleración (m/s ²)	$\Delta altitud$ (m)	pendiente (%)	ángulo (rad)
0	0	222	219,74	0	0	0	0	0	0	5,1369346	0,0513242
15	0	222	220,12	15	0	0	0	0	0,38	5,1369346	0,0513242
23	0,0113443	222	220,68	8	0,0113443	5,104935	5,104935	0,177254688	0,56	4,9363998	0,0493240
26	0,0189018	223	221,05	3	0,0075575	9,069	3,964065	0,367043056	0,37	4,8957989	0,0489189
28	0,0235796	223	221,27	2	0,0046778	8,42004	-0,64896	-0,090133333	0,22	4,7030655	0,0469960
30	0,0328683	223	221,7	2	0,0092887	13,71966	5,29962	0,736058333	0,43	4,6292807	0,0462598
31	0,037517	223	221,9	1	0,0046487	16,73532	3,01566	0,837683333	0,2	4,3022781	0,0429963
33	0,0455553	223	222,24	2	0,0080383	14,46894	-2,26638	-0,314775	0,34	4,2297501	0,0422723
34	0,0494244	223	222,39	1	0,0038691	13,92876	-0,54018	-0,15005	0,15	3,8768706	0,0387493
41	0,0593679	223	222,78	7	0,0099435	5,1138	-8,81496	-0,3498	0,39	3,9221602	0,0392015
42	0,059793	223	222,8	1	0,0004251	1,53036	-3,58344	-0,9954	0,02	4,7047753	0,0470131

Figura 3.3 Extracto de la tabla Excel utilizada para el cálculo de los diferentes perfiles

Hay que señalar que dado que la resolución⁴ que proporciona el software TCX Converter para el campo de la altitud es de 1 metro, y dado que los incrementos en distancia tomados entre dos posiciones consecutivas van en concordancia al intervalo de muestreo⁵, hace que se produzcan valoraciones erróneas de la pendiente. Por ello es necesario realizar una corrección de la altitud que le otorgue mayor definición.

Para dicha tarea se ha utilizado la herramienta *Basic Fitting* que incorpora MATLAB y que permite el ajuste de la altitud por un polinomio de grado n. De este modo podemos visualizar de manera simultánea varias curvas de regresión, permitiendo reconocer fácilmente aquella que mejor se ajuste. La herramienta proporciona además la ecuación de la curva finalmente elegida.

² GPS eXchange Format. Es el estándar más extendido para la transferencia de datos GPS entre aplicaciones.

³ Cada uno de los puntos registrados se denomina *waypoint*. Al conjunto de waypoints que forman parte de un mismo recorrido se le conoce como *track*.

⁴ Resolución: menor incremento de la variable que puede ser detectado con certidumbre.

⁵ Con señal estable se produce un registro de posición por segundo, por lo que el incremento en distancia es relativamente pequeño.

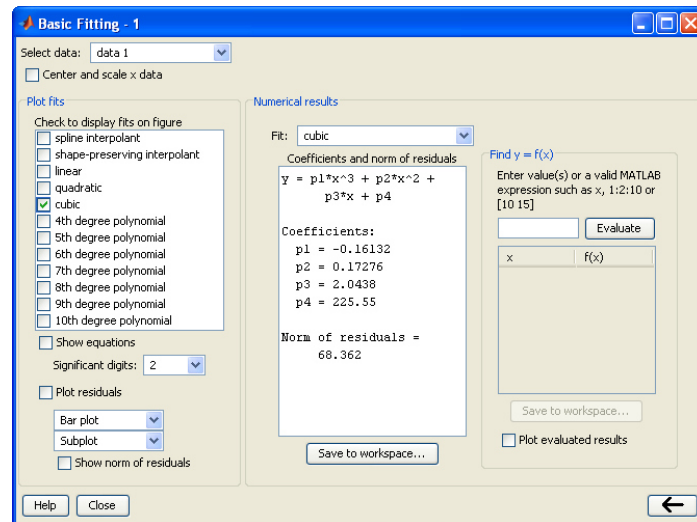
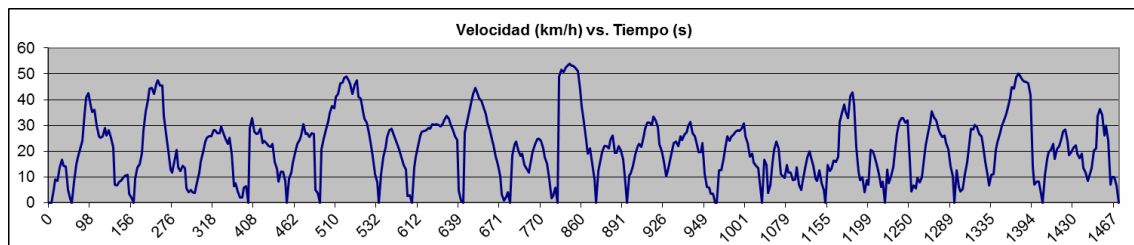
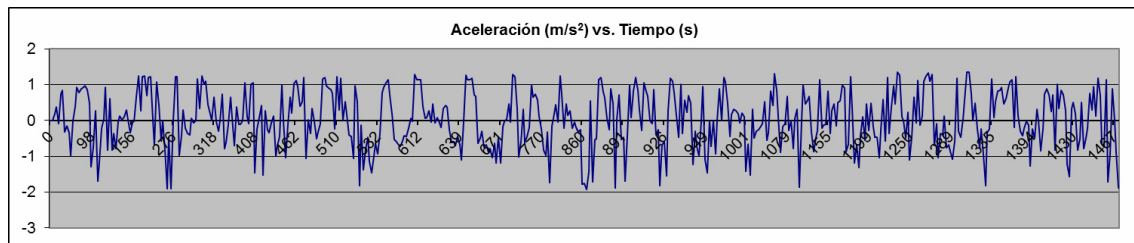


Figura 3.4 Herramienta Basic Fitting

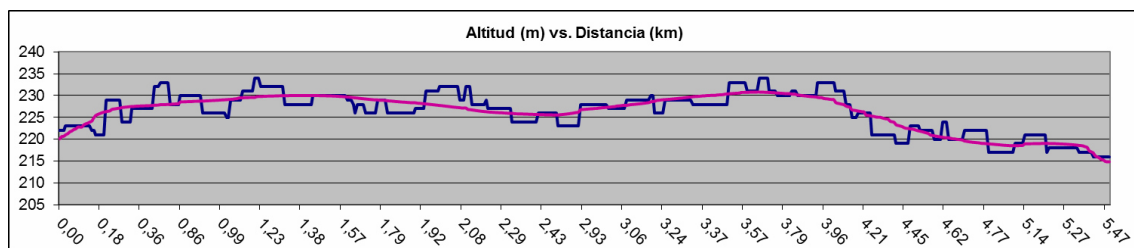
Tramo urbano: Calle Rioja - Camino las Torres (Circular 2)



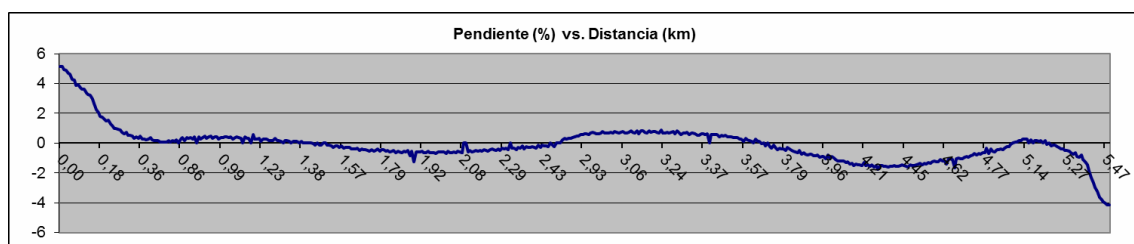
Gráfica 3.1 Perfil de velocidad del tramo urbano



Gráfica 3.2 Perfil de aceleración del tramo urbano

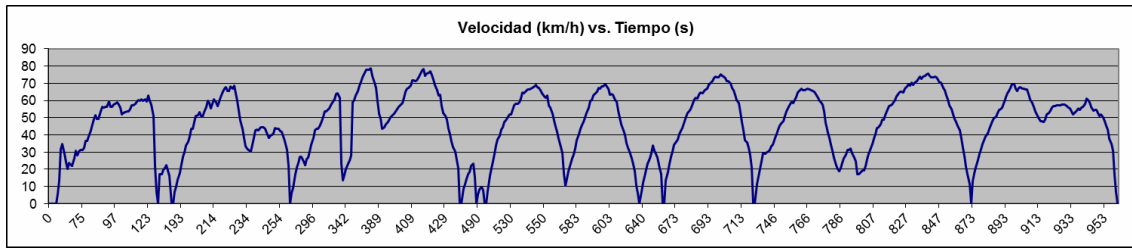


Gráfica 3.3 Perfil de altitud del tramo urbano (en azul la altitud original y en violeta la modificada)

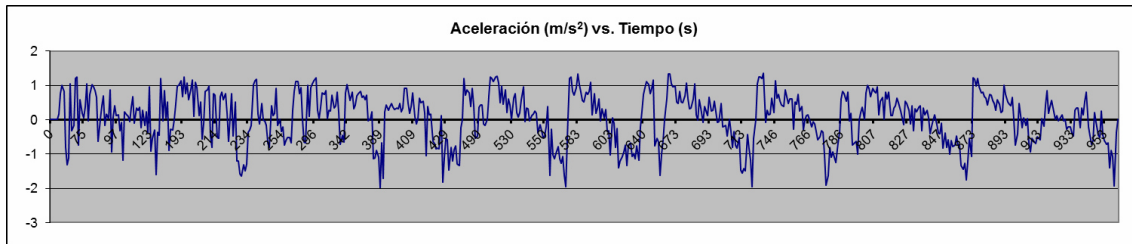


Gráfica 3.4 Perfil de pendiente del tramo urbano

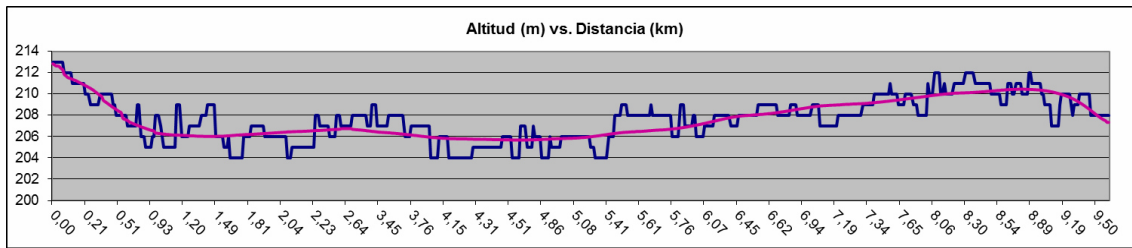
Tramo interurbano: Zaragoza - Utebo



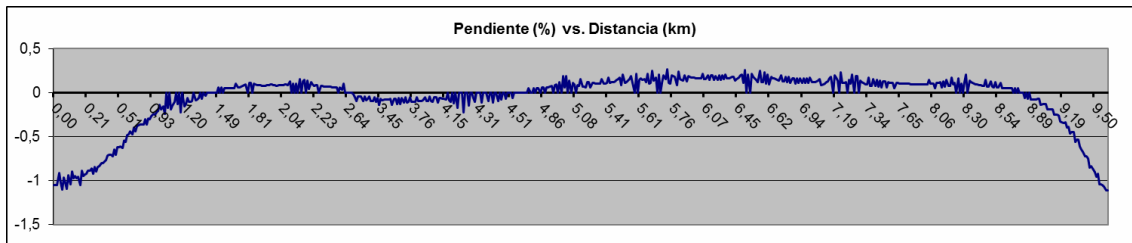
Gráfica 3.5 Perfil de velocidad del tramo interurbano



Gráfica 3.6 Perfil de aceleración del tramo interurbano



Gráfica 3.7 Perfil de altitud del tramo interurbano (en azul la altitud original y en violeta la modificada)



Gráfica 3.8 Perfil de pendiente del tramo interurbano

4. Modelo dinámico

En este apartado se muestra el modelo dinámico con el cual se obtendrán las curvas de potencia y par que utilizaremos para dimensionar el motor. Como entradas tendremos los perfiles de velocidad y ángulo de carretera obtenidos en la sección anterior.

Para empezar a construir el modelo primero tenemos que conocer la dinámica del vehículo.

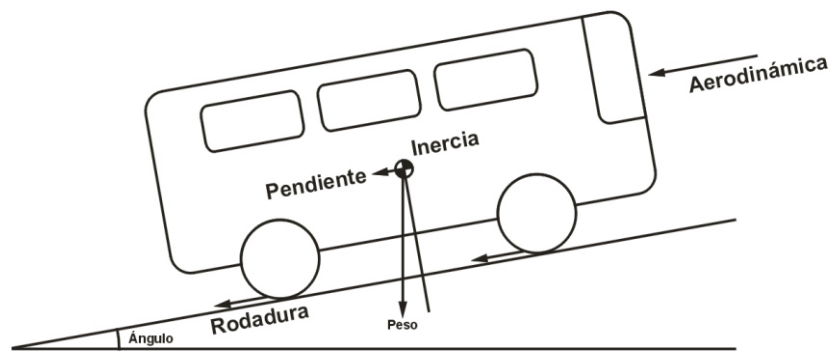


Figura 4.1 Esquema de las fuerzas que actúan sobre el autobús

Sobre el autobús actúan una serie de fuerzas resistentes que se oponen al movimiento. Las ecuaciones que describen el comportamiento de estas fuerzas son las siguientes:

- Resistencia a la rodadura: se debe a la fricción originada por la deformación del neumático al rodar por una superficie. El coeficiente de rozamiento depende de varios factores: rugosidad y material de la superficie; material, estructura, presión de inflado y temperatura del neumático; y velocidad de avance.

$$F_{rodadura} = \mu \cdot m \cdot g \quad (4.1)$$

- Resistencia aerodinámica: es aquella que experimenta un cuerpo por el hecho de desplazarse en el seno de un fluido, en este caso aire. Su contribución adquiere importancia al aumentar la velocidad (lo hace de forma cuadrática como se aprecia en la ecuación).

$$F_{aerodinámica} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot v^2 \quad (4.2)$$

- Resistencia por pendiente: se trata de la componente del peso cuya dirección siempre se manifiesta en sentido descendente. Cuando el vehículo circula cuesta abajo (pendiente negativa) esta fuerza pasa de ser resistente a convertirse en fuerza impulsora, ayudando al motor a vencer el resto de resistencias.

$$F_{pendiente} = m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (4.3)$$

- Resistencia por inercia: debida a la oposición que ofrece un cuerpo a modificar su estado dinámico. Su expresión viene dada por la segunda ley de Newton.

$$F_{inercia} = m \cdot a \quad (4.4)$$

Si queremos conseguir desplazamiento, el motor ha de ser capaz de generar una fuerza de empuje superior a la suma de las resistencias:

$$F_{\text{empuje}} > F_{\text{rodadura}} + F_{\text{aerodinámica}} + F_{\text{pendiente}} + F_{\text{inercia}} \quad (4.5)$$

Utilizando los bloques que nos ofrece MATLAB Simulink podemos implementar estas ecuaciones del siguiente modo:

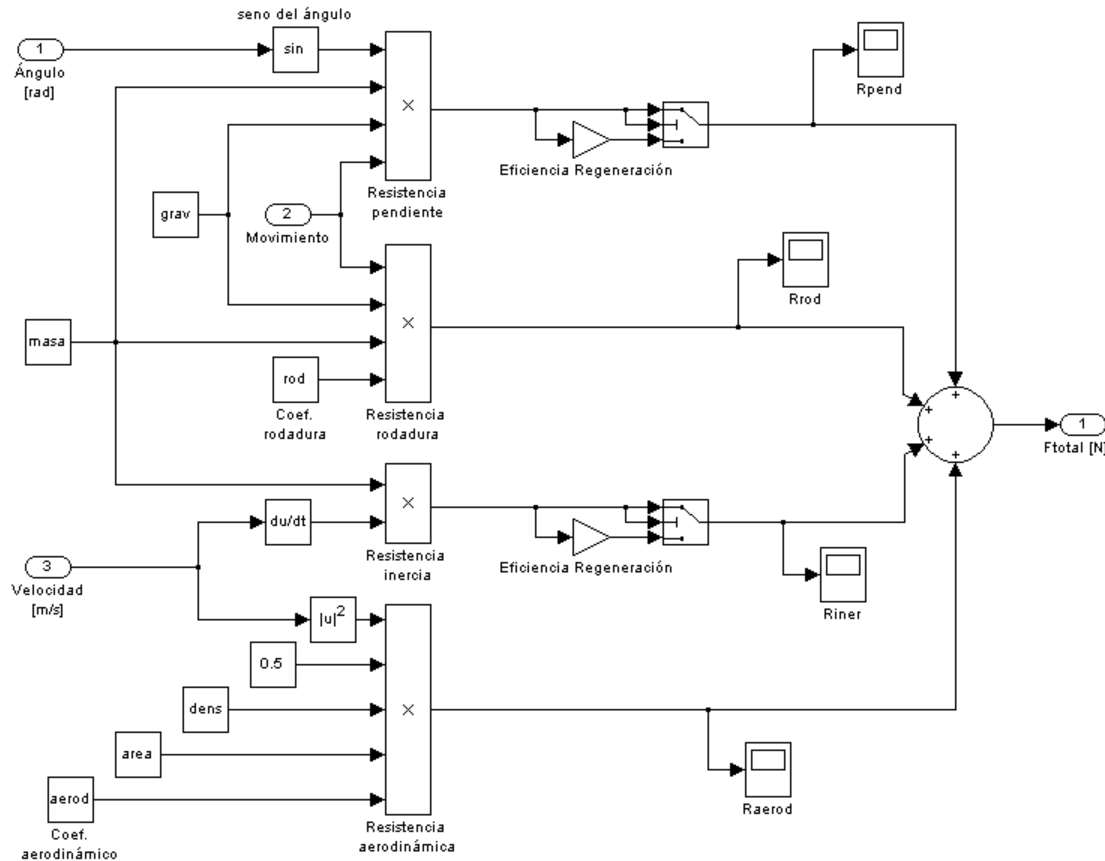


Figura 4.2 Modelo utilizado para el cálculo de la fuerza resistente total

Como entradas tendremos los perfiles de velocidad y ángulo de carretera obtenidos en la sección anterior. La otra entrada llamada “Movimiento” introduce un 1 o un 0 en función de si el vehículo está en movimiento o parado (1 en movimiento, 0 parado) puesto que las resistencias de rodadura y por pendiente solo se manifiestan con el vehículo en marcha.

Las fuerzas de inercia y por pendiente se tornan negativas cuando se decelera y se baja una pendiente, respectivamente. Esto significa que podemos recuperar parte de la energía acumulada por el vehículo: en caso utilizar frenado regenerativo, el motor eléctrico pasa a funcionar como generador cuando se somete a pares negativos, generando una corriente que puede se gestionada por el conversor de potencia para recargar las baterías.

El conjunto “Eficiencia Regeneración” formado por una ganancia y un *switch* permite incorporar un rendimiento al frenado regenerativo cuando se evalúe un vehículo que disponga de este sistema (será 0 en caso de que no disponga de él).

Para incluir de un modo más cómodo el resto de relaciones, encerramos el conjunto de bloques de la Figura 4.2 en el subsistema llamado “Cálculo Fuerza”.

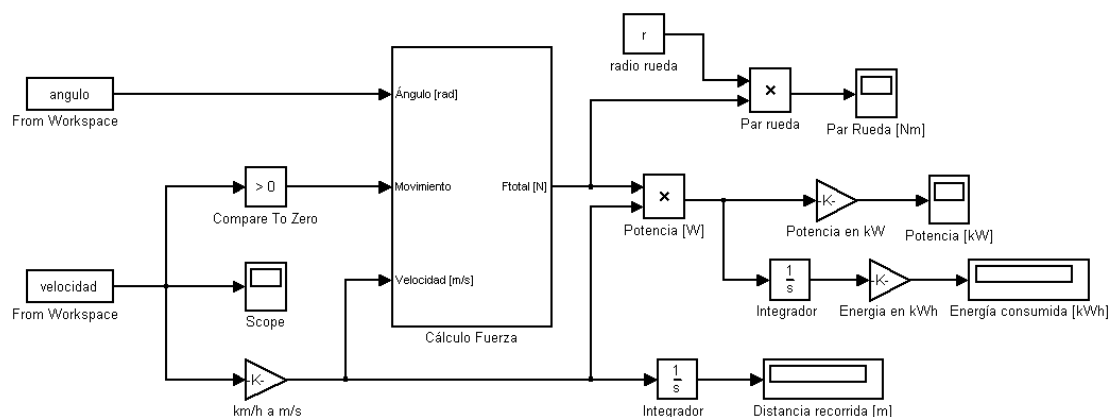


Figura 4.3 Modelo dinámico completo

El bloque “Compare To Zero” compara la señal de entrada (en nuestro caso la velocidad) generando un 1 en caso de que sea mayor que cero o un 0 en caso contrario. La salida de este bloque se utiliza para alimentar la entrada “Movimiento” del subsistema visto anteriormente.

Con el modelo dinámico ya construido pasamos a introducir los parámetros concretos de nuestro caso.

Símbolo	Parámetro	Valor
m	masa	10.950 kg
μ	coef. de rodadura	0,013
g	gravedad	9,81 m/s ²
ρ	densidad del aire	1,25 kg/m ³
A	área frontal	8 m ²
C _x	coef. aerodinámico	0,7
r	radio rueda	0,48 m
	eficiencia regeneración	0,4 (40%)

Tabla 4.1 Parámetros utilizados en la simulación

Consideraciones:

- El radio se calcula a partir del neumático que monta el autobús: **275/70 R 22,5** donde 275 es el ancho de la banda de rodadura en mm, la segunda cantidad se utiliza para expresar la altura del flanco y se hace a través de un porcentaje del ancho (en este caso la altura del flanco es un 70% el ancho de la banda de rodadura), R indica que es un neumático radial y 22,5 es el diámetro de la llanta en pulgadas.

$$r = \frac{1}{2} \left(22,5 \cdot 25,4 \frac{mm}{pulgada} + 2 \cdot 0,7 \cdot 275 \right) \frac{m}{1.000mm} \approx 0,48m \quad (4.6)$$

- Debido a que no es posible recuperar íntegramente la energía durante los frenados (parte se disipa en los discos cuando se actúa sobre el freno mecánico, parte se pierde en rozamientos internos de transmisión, etc.) la eficiencia del frenado regenerativo se valora en el 40%.

Fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*.

- El coeficiente aerodinámico depende del diseño de la carrocería del vehículo. Para autobuses este valor suele estar en torno al 0,7.

Fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*.

- El área frontal del autobús es de 8 m²: el autobús mide 2,55 m de ancho por 3,12 m de alto (Tabla 2.1 Especificaciones del Mercedes-Benz Citaro).

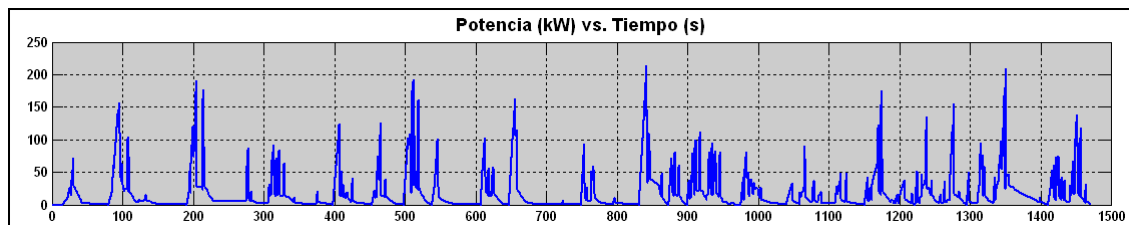
- El valor estimado para el coeficiente de rodadura de neumático sobre asfalto es 0,013. En realidad este coeficiente varía linealmente con la velocidad según indica la siguiente expresión basada en resultados experimentales:

$$\mu = 0,01 \left(1 + \frac{v(\text{km/h})}{160} \right) \quad (4.7)$$

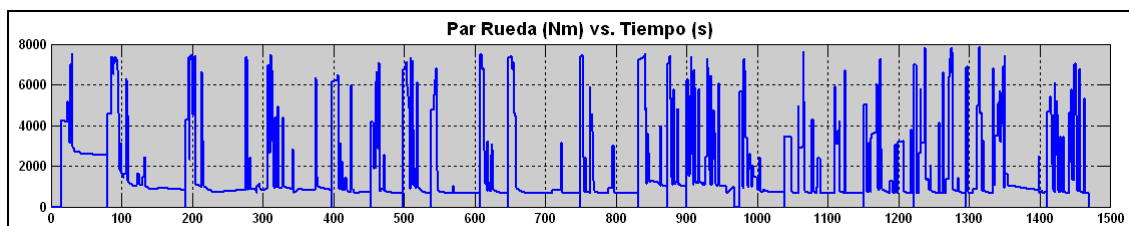
Fuente: *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*.

Tras ejecutar la simulación obtenemos los siguientes resultados:

Tramo urbano: Calle Rioja - Camino las Torres (Circular 2)

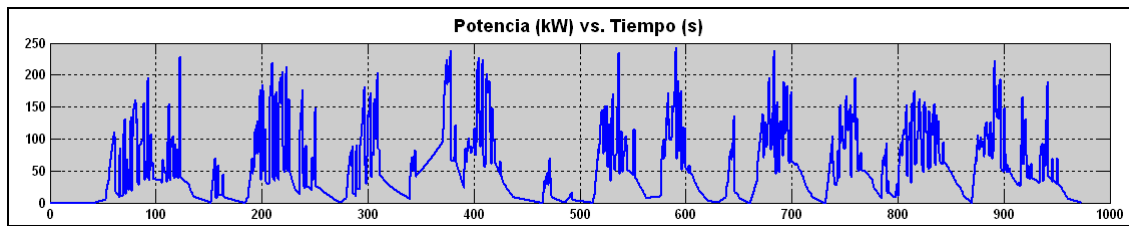


Gráfica 4.1 Perfil de potencia del tramo urbano

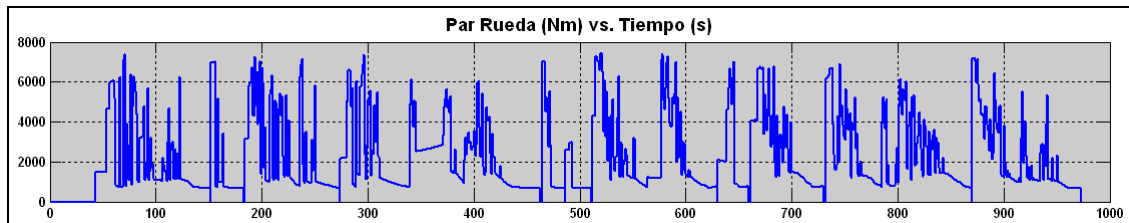


Gráfica 4.2 Perfil de par del tramo urbano

Tramo interurbano: Zaragoza - Utebo



Gráfica 4.3 Perfil de potencia del tramo interurbano



Gráfica 4.4 Perfil de par del tramo interurbano

El consumo energético de los trayectos ha sido de 0,96 kWh/km en el tramo urbano y 1,1 kWh/km en el interurbano (se ha empleado la eficiencia del 40% para el frenado regenerativo suponiendo que ambos tramos van a ser realizados por un autobús eléctrico que disponga de este sistema).

5. Motor eléctrico

De los resultados anteriores se observa que para poder cubrir las demandas de ambos tipos de trazado necesitaremos un motor eléctrico de al menos 250 kW. El par en rueda debería ser al menos de 8.000 Nm. Teniendo en cuenta que un motor por sí solo no puede proporcionar dicho par, es necesario contar con un reductor de velocidad que divida esa cantidad por la relación de transmisión. El conjunto motor-reductor ha de ser capaz además de llevar al autobús a velocidades de hasta 80 km/h (velocidad máxima del tramo interurbano).

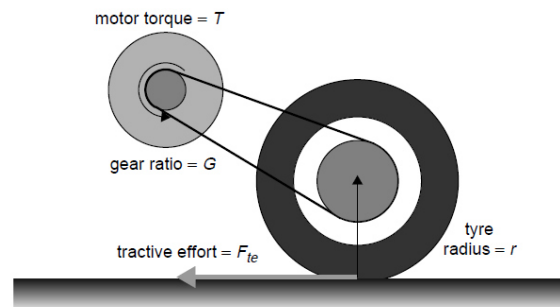


Figura 5.1 Principio de funcionamiento de un reductor
(fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

Las expresiones que definen el comportamiento de un reductor son las siguientes:

Reductor ideal
$$P_{motor} = P_{rueda} \quad (5.1)$$

Relación de transmisión
$$G = \frac{M_{rueda}}{M_{motor}} = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{rueda}} \quad (5.2)$$

En la selección del reductor, aparte de la relación de transmisión hay que tener en cuenta que debe estar diseñado para trabajar al nivel de potencia requerido. Puesto que vamos a manejar potencias de en torno a 250 kW, buscamos un fabricante que ofrezca esta posibilidad.



Figura 5.2 Reductor Tramec de ejes paralelos (Serie Z)

El fabricante italiano Tramec posee en su catálogo diferentes líneas de reductores, abarcando cada una de ellas un determinado rango de potencias. Concretamente en su Serie Z incluye reductores de ejes paralelos destinados a trabajar con grandes potencias.

Z	n ₁ = 1400			ZA	
	in	ir	n ₂ rpm	T _{2M} Nm	P kW
71A	5	5.09	275	270	8.0
	6.3	6.10	230	210	5.2
	8	7.88	177	180	3.5
90A	5	5.09	275	590	17.5
	6.3	6.10	230	480	11.9
	8	7.88	177	360	6.9
112A	5	5.09	275	1200	35.6
	6.3	6.10	230	1150	28.5
	8	7.88	177	780	14.9
140A	5	5.09	275	2350	69.8
	6.3	6.10	230	2150	53.3
	8	7.88	177	2100	40.2
180A	5	5.09	275	4800	142.5
225A	5	4.82	291	8600	270

Figura 5.3 Selección del modelo de la Serie Z (fuente: catálogo de reductores Tramec)

De los reductores que forman esta serie elegimos el modelo 225A, ya que es el único que cumple el requisito de potencia. Para este modelo solo existe una relación de transmisión posible, $G = 5$.

Otras características relevantes de este reductor son las siguientes:

- Permite alcanzar velocidades máximas de hasta 3.000 rpm.
- Tiene un rendimiento del 97%.
- Su peso es de 210 kg.

Una vez determinada la relación de transmisión que vamos a utilizar, ya podemos calcular los parámetros del motor que nos faltaban: el par máximo que debe proporcionar y su velocidad máxima de giro. Utilizando la ecuación 5.2

$$M_{motor} = \frac{M_{rueda}}{G} = \frac{8.000}{5} = 1.600 Nm \quad (5.3)$$

La velocidad lineal es el producto de la velocidad angular por el radio de la rueda

$$V = \omega_{rueda} \cdot r \quad (5.4)$$

Introduciendo la velocidad lineal máxima del autobús, es decir 80 km/h

$$\omega_{rueda} = \frac{80 km/h / 3,6}{0,48 m} = 46,3 s^{-1} \quad (5.5)$$

Utilizando nuevamente la ecuación 5.2

$$\omega_{motor} = G \cdot \omega_{rueda} = 5 \cdot 46,3 = 231,5 s^{-1} = 231,5 \frac{30}{\pi} rpm = 2.210,5 rpm \quad (5.6)$$

Luego, nuestro motor deberá ser capaz de alcanzar 2.210,5 rpm y proporcionar picos de par de 1.600 Nm.

5.1 Tipos de motor para vehículo eléctrico

Motor de corriente continua

Antiguamente, dada la simplicidad de su control, el motor de corriente continua era popularmente elegido para instalarse en el vehículo eléctrico. La aparición de procesadores digitales que permitían implementar esos mismos controles provocó la transición hacia máquinas de mayor eficiencia y menor tamaño.

En un motor c.c. existen dos formas de crear el campo inductor: con imanes permanentes (usados generalmente en motores de menor tamaño) o bien mediante bobinas devanadas alrededor de polos salientes del estator.

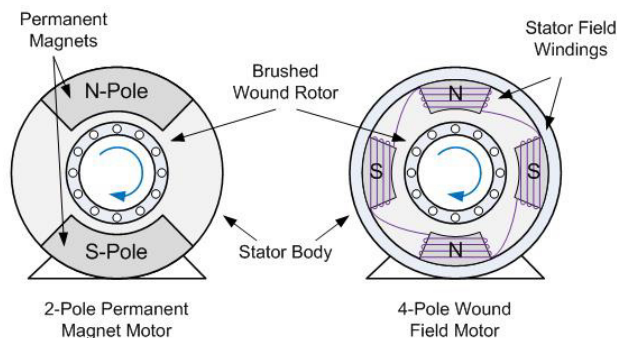


Figura 5.4 Motores de corriente continua: imanes permanentes y polos bobinados
(fuente: *Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart*)

El devanado inducido está constituido por un elevado número de bobinas conectadas en serie, alojadas en ranuras de la superficie del rotor. Sobre el rotor también se monta el colector de delgas, encargado de distribuir la energía eléctrica al devanado inducido. Las escobillas establecen la conexión del circuito eléctrico giratorio con la fuente de alimentación exterior.

En la siguiente figura se muestran las curvas de par y potencia características de un motor de corriente continua:

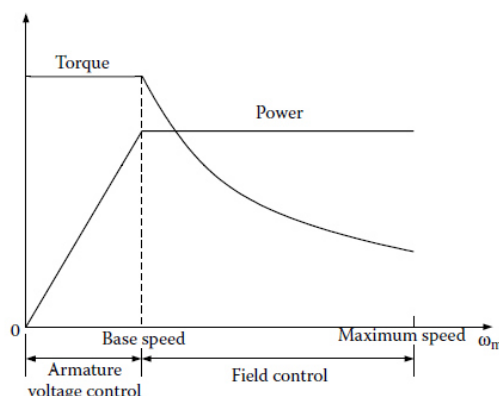


Figura 5.5 Curvas características de un motor de corriente continua
(fuente: *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*)

En ella podemos diferenciar dos zonas: funcionamiento a par constante (para velocidades inferiores a la nominal) y funcionamiento a potencia constante, que se consigue por debilitamiento del campo magnético inductor.

La región por debilitamiento de campo solamente es alcanzable en motores de estator bobinado, donde es posible controlar la cantidad de flujo magnético generado. Este tipo de motores permite además diferentes formas de conectar su devanado de excitación: en serie con el inducido, en paralelo, o bien a través de un circuito de alimentación independiente.

Motor de inducción

Los motores de inducción (también llamados asíncronos) están ampliamente extendidos y poseen una tecnología muy madura. Además, la aparición de los variadores de frecuencia hizo posible la utilización de este tipo de motores en aplicaciones donde se requiere controlar la velocidad.

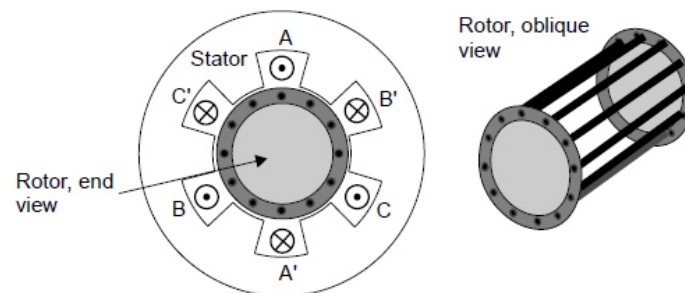


Figura 5.6 Motor asíncrono (fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

Un motor de inducción posee un devanado trifásico en el estator (alimentado en corriente alterna) y un devanado polifásico en el rotor (conocido como jaula de ardilla).

Al igual que en un motor de corriente continua, el par se produce por la interacción de las corrientes rotóricas con el campo magnético generado por el estator. Sin embargo el motor de inducción no necesita escobillas para introducir corriente al rotor: esta se induce siempre y cuando el rotor y el campo magnético no giren a la misma velocidad.

El motor de inducción es un tipo de motor duradero y fiable, de bajo coste, escaso mantenimiento y alta eficiencia (aunque ligeramente menor que el resto de motores sin escobillas, debido a las pérdidas que originan las corrientes inducidas del rotor).

Motor DC Brushless

El motor DC Brushless (sin escobillas) o BLDC parte del concepto del tradicional motor de corriente continua con escobillas en el que se intercambian las posiciones de rotor y estator. Su comportamiento es análogo al motor c.c. convencional (característica par-velocidad similar) utilizando conmutación electrónica en lugar de mecánica.

Al utilizar imanes permanentes alojados en el rotor (generalmente de neodimio), el diseño del motor DC Brushless es más simple que el del motor convencional, ya que elimina la complicación de transferir energía a un rotor en constante movimiento.

Sin embargo, se trata en realidad de un motor de corriente alterna: posee un bobinado estatórico trifásico, generalmente conectado en estrella, que se alimenta a través de un inversor trifásico.

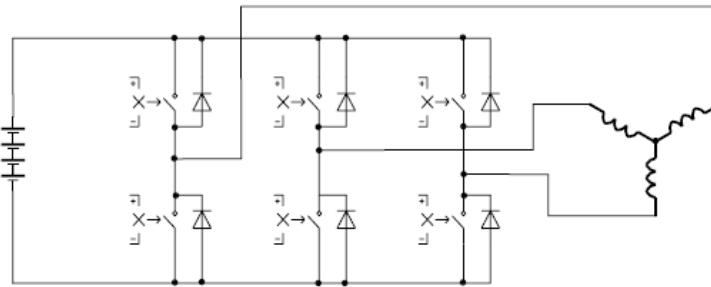


Figura 5.7 Inversor trifásico (fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

La conmutación de los interruptores del inversor se controla por medio de sensores de efecto Hall. Estos sensores son los que determinan la posición del rotor en todo momento.

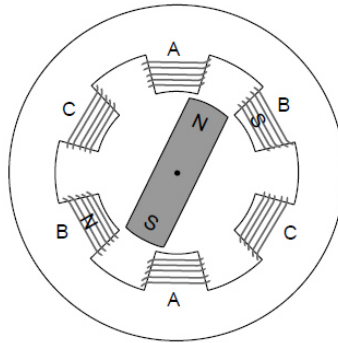


Figura 5.8 Funcionamiento de un motor DC brushless
(fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

El principio de funcionamiento de este motor se muestra en la Figura 5.8: la bobina B se energiza haciendo girar al rotor en sentido horario. Una vez el rotor se sitúa entre los polos de la bobina B, es la bobina C la que pasa a ser energizada, y así sucesivamente.

Este tipo de motor tiene como ventajas un ciclo de vida mayor, escaso mantenimiento y una alta eficiencia. Como desventajas, el elevado coste de los imanes y un control de velocidad más complejo.

Motor de reluctancia conmutada

El principio de funcionamiento de este tipo de motores consiste en la orientación que se da en un material ferromagnético (en este caso el rotor de la máquina) al verse sometido a un campo magnético. Esta orientación se produce debido a que el sistema trata en todo momento de buscar la situación de mínima reluctancia, circunstancia que se da cuando el entrehierro queda lo más ocupado posible por material del rotor.

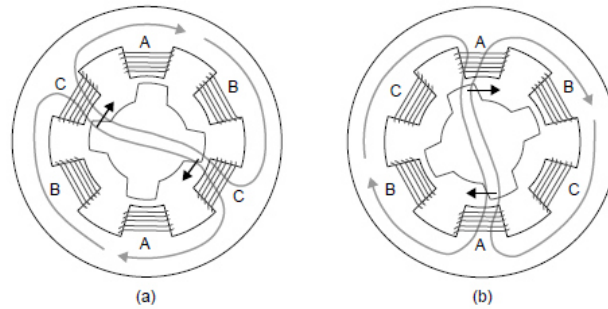


Figura 5.9 Funcionamiento de un motor de reluctancia conmutada
(fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

En la Figura 5.9 se muestran dos posiciones sucesivas durante su funcionamiento: en la situación (a) la bobina C se encuentra magnetizada y ejerce una fuerza sobre el rotor. En el momento en el que los salientes del rotor se aproximan a alinearse con el bobinado, la corriente por C se corta y pasa a energizarse el próximo bobinado, el A, manteniendo el rotor en constante movimiento. La correcta secuenciación de las corrientes hace necesario el uso de sensores que informen de la posición del rotor en cada instante.

Como ventajas, este tipo de motores poseen un rotor de baja inercia, robusto y sencillo de mecanizar (lo cual abarata los costes de producción). Como desventajas, tienen menor par que un motor asíncrono del mismo tamaño y el ruido que producen es un problema a solventar.

5.2 Selección del motor

Para el modelado del motor se ha utilizado el bloque “DC Machine” incluido en la librería de Simulink. Pese a no ser la tipología más utilizada en vehículo eléctrico, el motor de corriente continua posee un comportamiento sencillo de implementar y adecuado para el análisis de las necesidades energéticas.

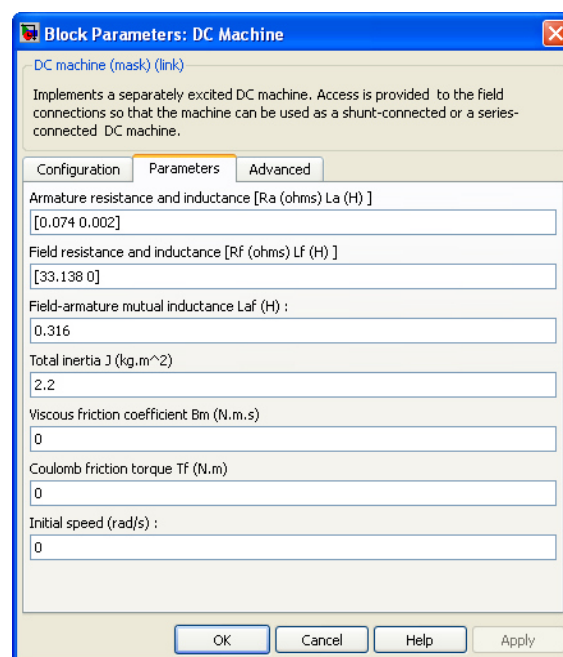


Figura 5.10 Parámetros del motor

Los parámetros que Simulink necesita para el modelado del motor se muestran en la Figura 5.10. Con el fin de utilizar datos reales, se ha recurrido al catálogo de motores Siemens de corriente continua.

Estos motores admiten sobrecargas según se muestra a continuación (los motores Siemens del rango de potencias considerado no están compensados).

Overload capacity (with reference to P_N and n_N) for				
	motors without compensation		motors with compensation	
	Torque	Current	Torque	Current
	M_{max}/M_N	I_{max}/I_N	M_{max}/M_N	I_{max}/I_N
15 s	1.6	~ 1.85	1.8	~ 1.85
5 s	1.8	~ 2.2	2.0	~ 2.1

Figura 5.11 Capacidad de sobrecarga de los motores Siemens

Recordemos que el motor tiene que ser capaz de alcanzar 2.210,5 rpm y proporcionar picos de 1.600 Nm. Teniendo en cuenta lo anterior podemos seleccionar un motor cuyo par nominal sea 1,6 veces inferior al par máximo, es decir uno de 1.000 Nm.

Rated speed n_N rpm					Rated output P_N kW	Rated torque M_N Nm	Maximum field weakening speed ¹⁾ n_{Fmax} rpm	Order No.	Rated current I_N A	Efficiency η %	Armature circuit Resistance at 120 °C R_a mΩ	Inductance L_a mH
at rated armature voltage 420 V 470 V 520 V 600 V 720 V 810 V												
Overall length 6												
745					96	1230	2020	1 6 226-0NA -1WV3	264	85	180	4.71
	845				109	1230	2020	-1WV3	264	86		
		950			122	1230	2020	-7MV3	262	87		
			1110		142	1220	2040	-7NV3	262	89		
				1350	171	1210	2050	-2XV3	258	90		
					192	1200	1850	-2YV3	256	91		
855					110	1230	2020	1 6 226-0NB -1WV3	296	86	139	3.56
	970				125	1230	2020	-1WV3	298	88		
		1080			139	1230	2020	-7MV3	296	89		
			1270		162	1220	2040	-7NV3	294	90		
				1540	193	1200	1730	-2XV3	288	91		
1020					132	1240	1970	1 6 226-0NC -1WV3	350	88	103	2.7
	1150				148	1230	1990	-1WV3	348	89		
		1280			164	1220	2000	-7MV3	346	90		
			1500		190	1210	1790	-7NV3	342	91		
1260					156	1180	2460	1 6 226-0ND -1WV3	408	89	74	1.91
	1420				175	1180	2460	-1WV3	406	90		
		1590			193	1160	2500	-7MV3	400	91		
			1850		222	1150	2520	-7NV3	396	92		
				2240	260	1110	2580	-2XV3	382	93		
					286	1080	2640	-2YV3	372	93		
1480					182	1170	2650	1 6 226-0NE -1WV3	470	90	55	1.49
	1660				205	1180	2650	-1WV3	472	91		
		1850			225	1160	2680	-7MV3	464	92		
			2150		256	1140	2700	-7NV3	454	92		
				2600	296	1090	2700	-2XV3	434	93		
1750					218	1190	2660	1 6 226-0NF -1WV3	560	91	38.8	1.03
	1970				242	1170	2680	-1WV3	550	92		
		2180			262	1150	2700	-7MV3	535	92		
			2540		296	1110	2700	-7NV3	520	93		
2100					248	1130	2680	1 6 226-0NG -1WV3	625	92	26	0.67
	2360				272	1100	2700	-1WV3	610	93		
		2620			294	1070	2700	-7MV3	595	93		

Figura 5.12 Selección del motor.

El motor finalmente elegido proporciona un par nominal de 1.110 Nm cuando se alimenta a una tensión de 720 V.

Otros parámetros a tener en cuenta se muestran en la siguiente figura. En ella se aprecia una variación del peso en función del sistema de refrigeración que monte el motor (se ha considerado utilizar un sistema externo montado por separado, código 1GH6 226).

Motor type	Field power approx. P_{field} kW	Moment of inertia J kgm ²	Mechanical limit speed n_{mech} rpm	Weight, net approx. kg
1GG6 226	2.9	2.2	3000	880
1GH6 226	2.9	2.2	3000	840
1HS6 226	2.9	2.2	3000	1000

Figura 5.13 Resto de parámetros del motor

Otras consideraciones:

- La tensión de alimentación del devanado inductor es de 310 V según se indica en el catálogo. Dado que conocemos la potencia (2,9 kW), podemos determinar tanto la resistencia de este devanado como la intensidad que circula por él.

$$P_f = 2.900W = 310V \cdot I_f \rightarrow I_f = 9,35A \quad (5.7)$$

$$R_f = \frac{310V}{9,35A} = 33,138\Omega \quad (5.8)$$

- Puesto que el devanado inductor está alimentado en corriente continua, la inductancia de campo L_f no va a tener efecto.
- Se han despreciado las pérdidas por fricción (fricción viscosa y fricción de Coulomb).

5.3 Ajuste del modelo

Al no disponer de datos para la inductancia mutua (L_{af}), se construyó el siguiente esquema con el que poder hacer una estimación. El proceso consistió en dar valores al parámetro hasta conseguir visualizar el régimen nominal señalado en el catálogo.

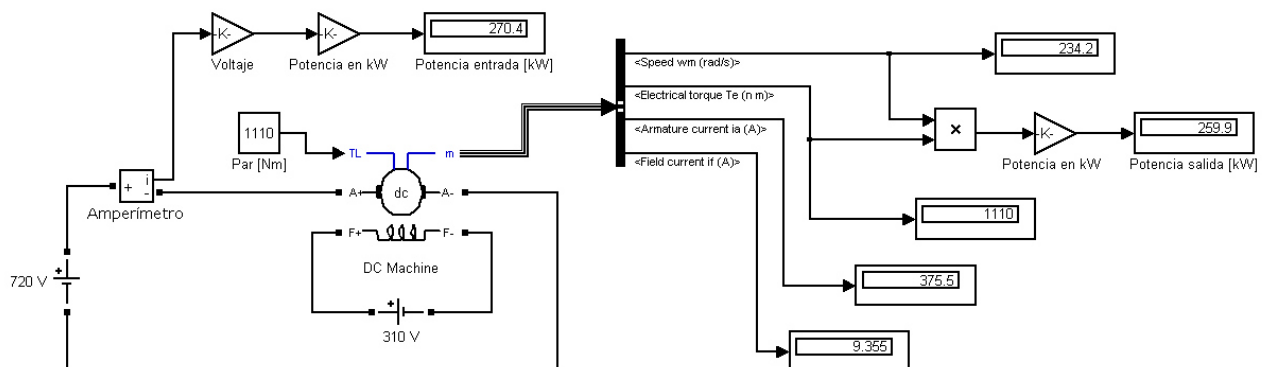


Figura 5.14 Esquema utilizado para calibrar el motor

Como resultado del proceso la inducción mutua se estableció en 0,316 Henrios.

También se monitorizaron las potencias de entrada y salida para poder realizar el cálculo del rendimiento:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{259,9}{270,4} = 0,96 \quad (5.9)$$

El modelo del motor posee un rendimiento del 96% en el punto nominal, algo superior al indicado por el fabricante (93%).

6. Convertidor de potencia

Nuestro motor debe ser alimentado con corriente continua, justo el tipo de corriente que suministra una batería. Sin embargo esta lo hace a una tensión fija. Si conectásemos el motor directamente a la batería, este giraría siempre a una misma velocidad, proporcional a la tensión de alimentación.

Es por ello necesario intercalar entre ambos algún elemento que nos permita controlar a voluntad el nivel de tensión que llega al motor y por tanto su velocidad de giro.

El elemento destinado a transformar la corriente continua de un nivel de tensión a otro es el convertidor de potencia DC-DC, también conocido como *chopper*. Las ventajas de este sistema son su bajo peso (debido a su escaso número de componentes) y su elevada eficiencia.

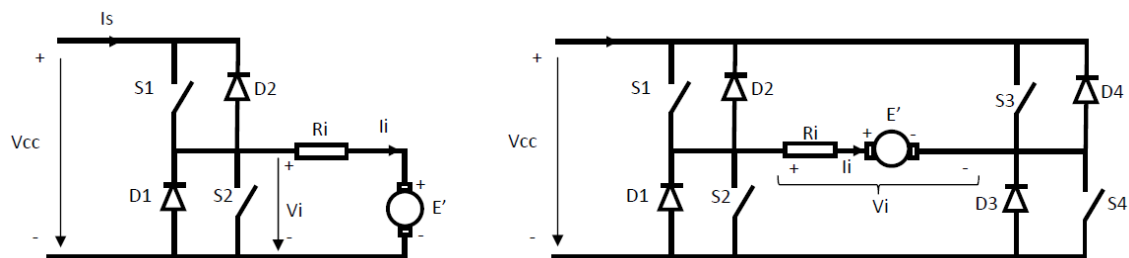


Figura 6.1 Chopper de 2 cuadrantes (izquierda) y chopper de 4 cuadrantes (derecha)

En función de la configuración de sus elementos, existen diferentes tipologías que nos permitirán trabajar en unos u otros cuadrantes del motor:

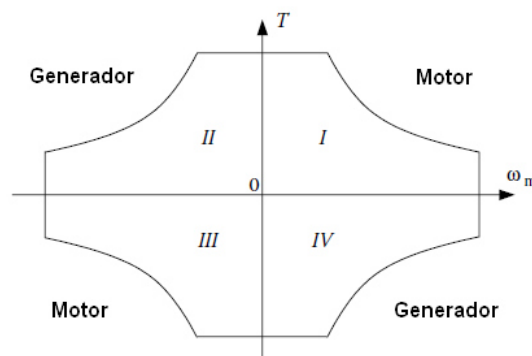


Figura 6.2 Cuadrantes del motor

En la Figura 6.2 los ejes de par y velocidad angular dividen el plano en cuatro zonas. Como veremos más adelante, en un motor de corriente continua el par es proporcional a la intensidad del devanado inducido y la velocidad angular está relacionada con la tensión aplicada entre sus terminales. El frenado regenerativo se da en los cuadrantes donde motor funciona como generador, devolviendo la energía a las baterías.

Para el análisis que nos ocupa será suficiente trabajar en el semiplano de velocidades positivas (cuadrantes I y IV) utilizando para ello el chopper de dos cuadrantes mostrado en la Figura 6.1.

Hay que tener presente que un autobús real utilizaría el chopper de 4 cuadrantes para permitir la marcha atrás. También podría utilizar un chopper dos cuadrantes con marcha atrás mecánica (es decir, con caja de cambios), sin embargo la tendencia en este tipo de vehículos es eliminar componentes mecánicos, pues requieren mantenimiento e incrementan el peso (el hecho de utilizar un chopper de cuatro cuadrantes en lugar de uno de dos no supone un incremento significativo del peso).

6.1 Funcionamiento del chopper de dos cuadrantes

El chopper de dos cuadrantes (I y IV) se trata en realidad de la conexión en paralelo de dos esquemas más simples: el convertidor directo (que trabaja en el cuadrante I) y el convertidor inverso (que trabaja en el cuadrante IV). Entender el funcionamiento de cada uno por separado supone entender el funcionamiento del conjunto.

Convertidor directo

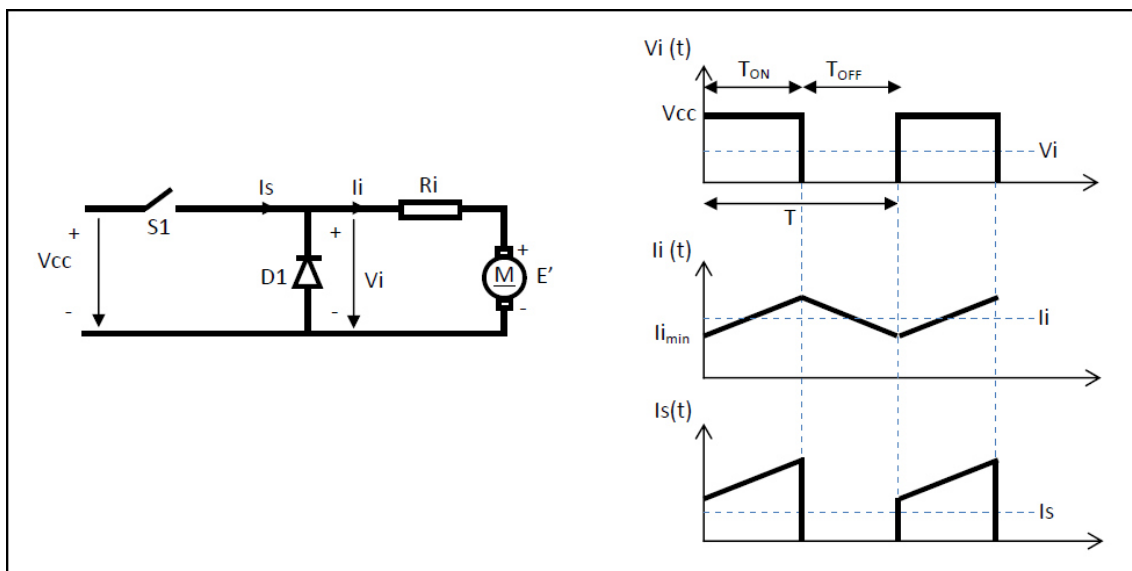


Figura 6.3 Convertidor directo (cuadrante I)

De la batería llega una tensión fija V_{cc} . El interruptor $S1$ (en realidad es un tipo de transistor como veremos más adelante) conmuta a una frecuencia determinada. La relación entre el tiempo que $S1$ está cerrado (ON) frente al tiempo total determina la tensión media que finalmente recibe el motor. A esta relación se la conoce como “duty cycle” (valor que puede estar entre 0 y 1):

$$D = T_{ON} / T \quad (6.1)$$

$$V_i = D \cdot V_{cc} \quad (6.2)$$

Al abrir $S1$ la corriente sigue circulando por el motor gracias a la energía almacenada por el devanado inducido (R_i), sin embargo la intensidad a partir de este punto empieza a caer progresivamente (véase la gráfica de I_i).

Convertidor inverso

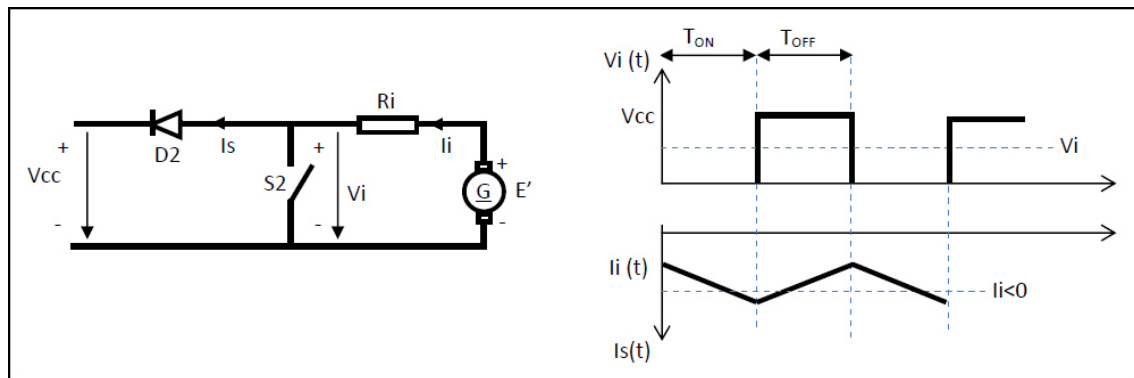


Figura 6.4 Convertidor inverso (cuadrante IV)

En este caso el motor se encuentra trabajando como generador. Con el interruptor S2 cerrado (ON) el devanado inducido está cortocircuitado y acumula energía en forma de campo magnético. Al abrir S2, la suma de la fuerza contraelectromotriz y la tensión debida a la inductancia L_i del devanado inducido supera a V_{cc} .

$$V_{cc} < L_i \frac{dI}{dt} + E' \quad (6.3)$$

Esto hace que el diodo entre en conducción dejando pasar la corriente hacia la batería.

6.2 Tipos de transistores

El transistor bipolar (BJT) fue el primero en ser usado en aplicaciones de conmutación. Su utilización como electrónica de potencia ha quedado desplazada por el resto de tecnologías.

Los siguientes en aparecer fueron los MOSFET, dispositivos que ya no estaban controlados por corriente sino por tensión. Son los transistores más rápidos que existen.

El IGBT fue el último en aparecer. Es un híbrido que tiene las ventajas de la alta capacidad de manejo de corriente propias de un transistor bipolar, con la facilidad del control de conducción por tensión que ofrece un MOSFET. Es comúnmente elegido en aplicaciones de alta potencia.

Tecnología	BJT	MOSFET	IGBT
Simbolo			
Tensión máxima (V)	1.200	1.000	2.000
Intensidad máxima (A)	700	100	500
Frecuencia máxima (kHz)	25	1.000	75

Figura 6.5 Límites habituales de las diferentes tecnologías

6.3 Modelado del convertidor

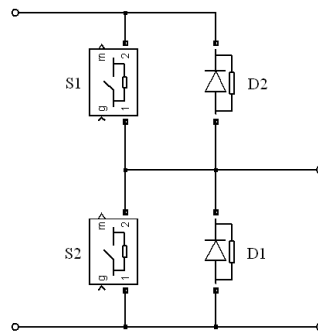


Figura 6.6 Modelo del convertidor

Para modelar el convertidor chopper necesitamos conocer algunos parámetros de los componentes que incorpora: la resistencia en estado de conducción y la tensión umbral.

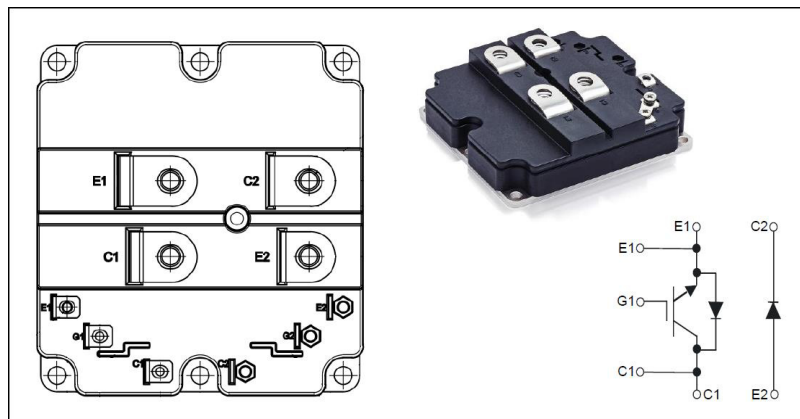


Figura 6.7 Módulo IGBT de ABB

Los datos empleados se han extraído de la hoja de características del módulo IGBT HiPak 5SNE fabricado por ABB. Este encapsulado está preparado para ser utilizado en convertidores chopper de altas prestaciones.

Es capaz de manejar voltajes de 1.700 V e intensidades de 800 A (recordemos que nuestro motor necesita voltajes en torno a 720 V e intensidades máximas de 706 A). Tanto el IGBT como el diodo tienen una resistencia interna de $0,18 \text{ m}\Omega$ (a 25°C) y la tensión umbral del diodo es de 1,65 V (a 25°C). El peso del módulo es de 800 gramos.

Existen marcas comerciales que diseñan electrónica destinada al control de motores c.c para vehículos eléctricos. La siguiente imagen muestra el controlador modelo Soliton 1 del fabricante Evnetics basado en tecnología IGBT.



Figura 6.8 Controlador Evnetics Soliton 1

7. Controlador

El controlador es el dispositivo encargado de comandar al convertidor de potencia por medio de señales generadas a partir de información que recibe del sistema. Se compone de dos elementos principales: el procesador y sensores. Los sensores traducen las magnitudes físicas medibles en señales eléctricas que puedan ser interpretadas por el procesador.

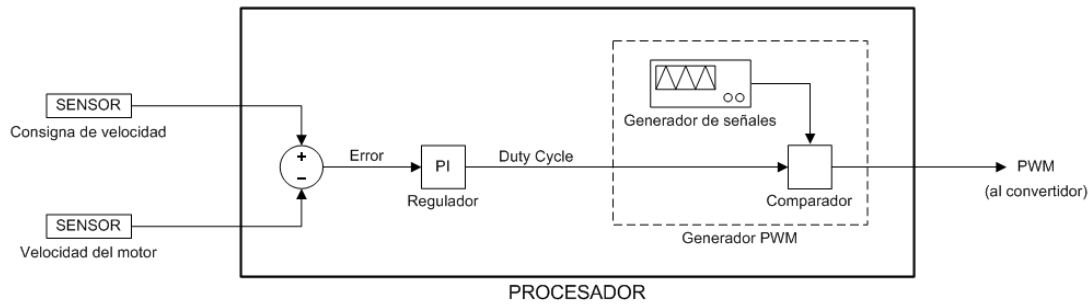


Figura 7.1 Esquema de la unidad de control

En nuestro caso utilizaremos dos sensores: el potenciómetro del pedal de aceleración (que establece la consigna de velocidad demandada por el conductor del vehículo) y el tacómetro (que mide la velocidad de giro del motor); aunque en controladores comerciales podemos encontrar más: para el estado de carga de la batería, intensidad que circula por los devanados, temperatura del motor, etc.

Dentro del procesador encontramos un sumador, el regulador PI y el módulo de generación de pulsos (PWM).

El sumador ejecuta en realidad la diferencia entre las variables monitorizadas. Su objetivo es informar al regulador acerca del nivel de desvío instantáneo que existe entre la referencia establecida por el conductor⁶ y la velocidad real del motor. A continuación el regulador genera una acción con el fin de intentar corregir dicho desvío. Este tipo de configuración es la base de un sistema de control realimentado.

Por último encontramos el módulo generador de pulsos (Generador PWM). Basado en la técnica de modulación por ancho de pulsos (Pulse-Width Modulation), este módulo produce el tipo de señal adecuado para el disparo de los IGBT del convertidor.

7.1 El regulador PI

Tenemos por tanto que implementar un regulador que trabajando con el error cometido genere las acciones adecuadas. El regulador PI (proporcional-integral) genera una salida del tipo:

$$D(t) = k \cdot e(t) + \frac{k}{T} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7.1)$$

donde $D(t)$ representa la acción generada (que en nuestro caso se corresponde con el “Duty Cycle”), $e(t)$ es el error y k, T son parámetros que habrá que calcular.

⁶ Para poder comparar adecuadamente ambas señales la referencia debe ser previamente acomodada.

El nombre de regulador PI se debe a que su respuesta es, como indica la ecuación que lo define, la suma de dos contribuciones que operan con el error de forma diferente: una lo hace de manera proporcional y la otra lo integra en el tiempo. Esta última contribución es la que permite eliminar el error en régimen permanente.

La función de transferencia de un proporcional-integral es:

$$R(s) = k \frac{Ts + 1}{Ts} \quad (7.2)$$

7.2 Cálculo del regulador

Para el cálculo del regulador necesitamos conocer antes las ecuaciones que rigen el comportamiento de la planta⁷. Seguidamente obtendremos su función de transferencia haciendo uso de un diagrama de bloques. Con la función de transferencia de la planta ya pueden determinarse los parámetros que hacen que el sistema responda rápidamente y sin sobreoscilaciones.

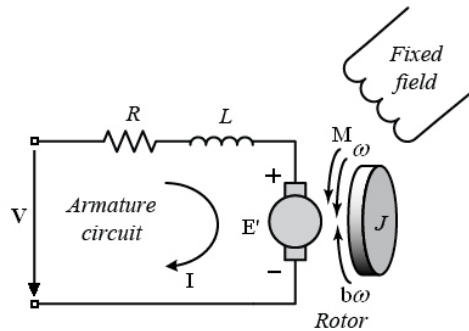


Figura 7.2 Esquema de un motor (fuente: librería de MATLAB)

Ecuación de la parte eléctrica

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + E' \quad (7.3)$$

Ecuación de la parte mecánica

$$M = M_{carga} + M_{aceleración} + M_{fricción} = M_{carga} + J \frac{d\omega}{dt} + b\omega \quad (7.4)$$

El par que debe ejercer el motor (M) es la suma de tres términos: el par de la carga en régimen permanente, el par de aceleración y el par de fricción viscosa (término que supondremos despreciable). J es el momento de inercia del rotor y b el coeficiente de fricción viscosa.

Un motor de corriente continua satisface las siguientes relaciones:

$$E' = k_E \cdot \omega \quad (7.5)$$

$$M = k_M \cdot I \quad (7.6)$$

donde k_E es la constante de la fuerza contraelectromotriz y k_M es la constante de par.

⁷ Al sistema o proceso objeto de control se le conoce como planta (en nuestro caso el motor).

Podemos hallar el valor de estas constantes utilizando parámetros que ya conocemos. Para el motor trabajando en el punto nominal:

$$k_M = \frac{M_n}{I_n} = \frac{1.110}{382} = 2,9 \text{ Nm/A} \quad (7.7)$$

Recordemos que la velocidad nominal del motor es $2.240 \text{ rpm} = 234,6 \text{ s}^{-1}$

$$E'_n = V_n - R \cdot I_n = 720 - 0,074 \cdot 382 = 691,73 \text{ V} \quad (7.8)$$

$$k_E = \frac{E'_n}{\omega_n} = \frac{691,73}{234,6} = 2,95 \text{ V/s}^{-1} \quad (7.9)$$

Para obtener el diagrama de bloques del motor aplicamos la transformada de Laplace y ordenamos convenientemente las ecuaciones anteriores.

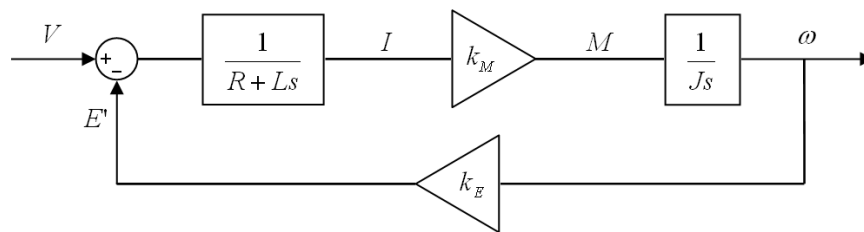
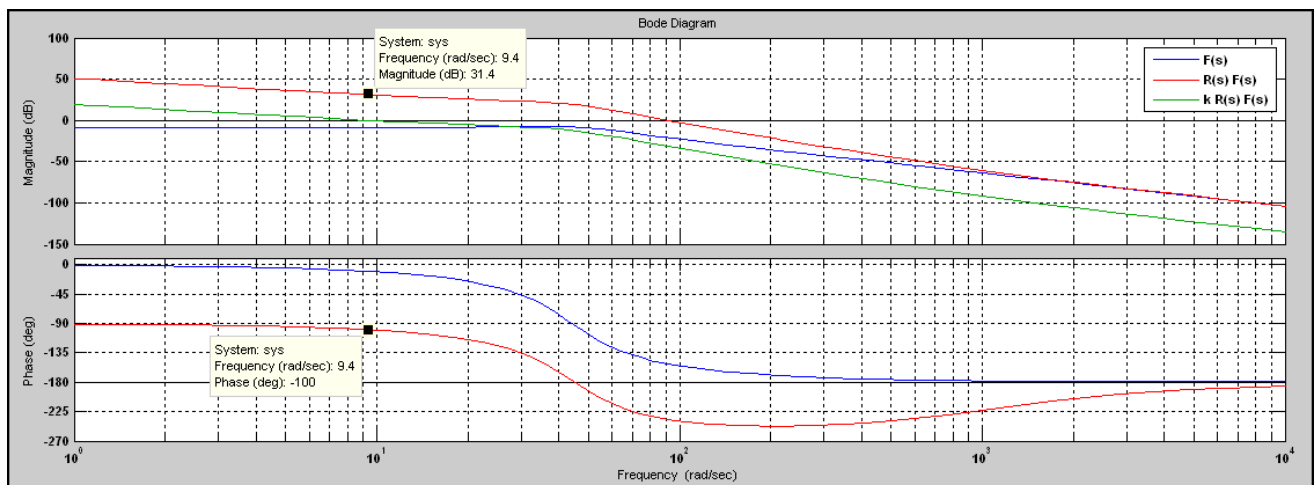


Figura 7.3 Diagrama de bloques del motor (planta)

La función de transferencia del motor queda:

$$F(s) = \frac{2,9}{0,0044s^2 + 0,1628s + 8,55} \quad (7.10)$$

Se trata de un segundo orden subamortiguado (dos polos complejos conjugados) por lo que debemos recurrir a técnicas frecuenciales para el cálculo del regulador. Esto supone trabajar con el diagrama de Bode de la función en bucle abierto.



Gráfica 7.1 Diagrama de Bode

Como queremos que el sistema en bucle cerrado alcance el régimen permanente sin sobreoscilaciones, hemos de conseguir un margen de fase de al menos 80° . Esto puede hacerse eligiendo como frecuencia de transición⁸ 1000 rad/sec (con lo que pasamos de la línea azul a la línea roja) y tomando posteriormente como ganancia k aquella que ajuste la magnitud a 0 dB (línea verde):

$$-31,4 \text{ dB} = 20 \log_{10} k \rightarrow k = 10^{\frac{-31,4}{20}} = 0,027 \quad (7.11)$$

7.3 Validez del regulador

Para comprobar el nivel de acierto en la elección de los parámetros del regulador se ha hecho uso del siguiente modelo implementado en Simulink. Representa el esquema en bucle cerrado que necesitamos para controlar el conjunto convertidor-motor, tal y como se explicó anteriormente.

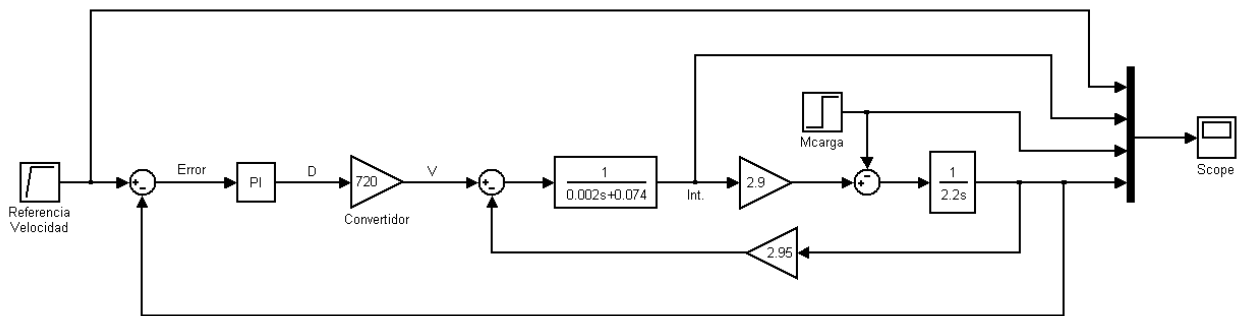


Figura 7.4 Modelo del sistema en bucle cerrado

La función de transferencia del convertidor se ha obtenido a partir de la ecuación del duty cycle que, recordemos, era la siguiente:

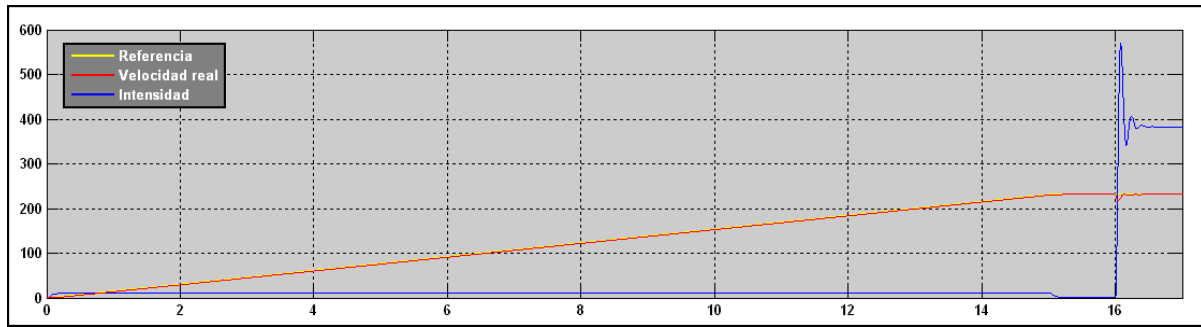
$$V = D \cdot V_{cc} \quad (7.12)$$

Esto supone incluir una ganancia de 720 voltios en la cadena directa, por lo que los parámetros k y T han de quedar finalmente divididos por este valor (notar que en el cálculo del regulador no se ha tenido en cuenta al convertidor de potencia).

Las entradas empleadas para analizar el comportamiento del sistema han sido:

- una rampa de 0 a $231,5 \text{ s}^{-1}$ en 15 segundos como referencia de velocidad (lo que supondría alcanzar una velocidad de 80 km/h con una aceleración aproximada de $1,5 \text{ m/s}^2$)
- un escalón de par de carga (de 1.110 Nm) en el segundo 16. Dado que el par de carga se modela como una perturbación del sistema, es interesante observar su efecto por separado, una vez el sistema ha alcanzado la estabilidad, y poder comprobar de este modo la eficacia del regulador en la atenuación de perturbaciones.

⁸ La frecuencia de transición es la inversa del parámetro T .



Gráfica 7.2 Respuesta del sistema en bucle cerrado

A la vista de los resultados, podemos concluir que la elección de los parámetros ha sido la adecuada: el motor sigue casi de modo perfecto la referencia de velocidad y se recupera rápidamente ante la entrada de perturbaciones.

Sin embargo, la curva de la intensidad manifiesta la importancia de mantener contenidas dichas perturbaciones. Un ejemplo de ello se da durante la ejecución de aceleraciones bruscas, pues se generan picos de intensidad que, en caso de sobrepasar el máximo permitido, pueden ser muy perjudiciales para el motor.

Existen otros esquemas de control más complejos, como es el caso de la línea de controladores Siemens Sinamics, que permiten limitar la corriente utilizando una configuración en cascada con regulador de corriente intermedio. Estos módulos incluyen además un convertidor de potencia basado en tiristores (pues están preparados para alimentarse en corriente alterna) y un bucle para el control del flujo magnético del motor (ofreciendo la posibilidad de trabajar en la zona de debilitamiento de campo).

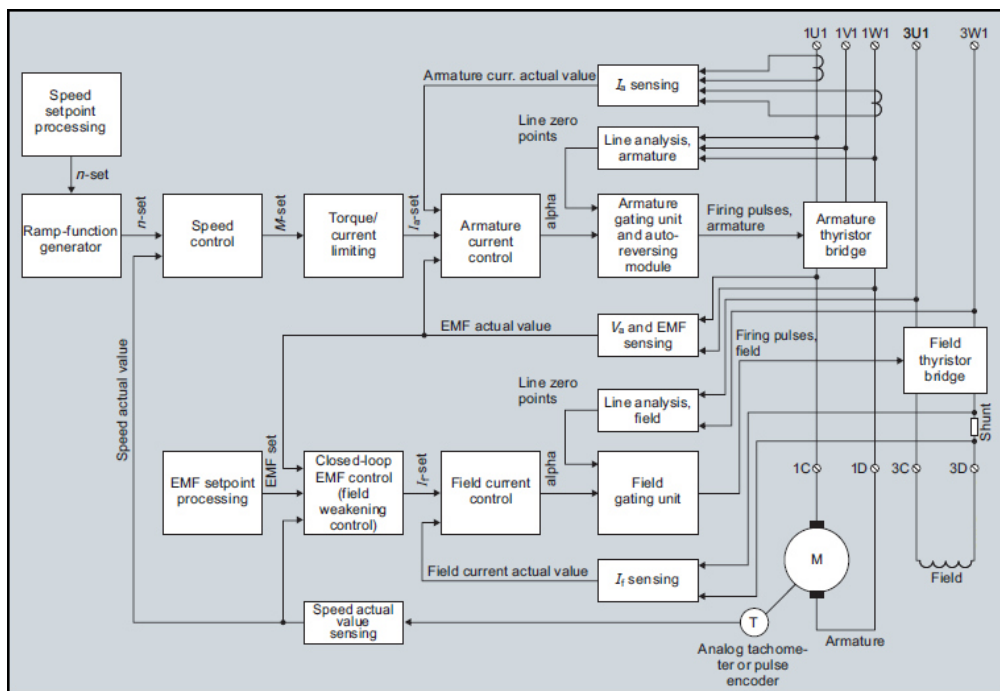


Figura 7.5 Controlador Siemens Sinamics

8. El ciclo urbano

Para llevar a cabo un análisis de forma genérica, en lugar de trabajar con un trayecto en concreto se ha utilizado el ciclo urbano ECE-15 basado en la legislación europea sobre emisiones.

El ciclo ECE-15 es un ciclo de conducción diseñado para evaluar el consumo de vehículos durante la circulación en entorno urbano. Tiene una velocidad máxima de 50 km/h (que coincide con el máximo permitido para circulación urbana) y recorre aproximadamente un kilómetro en 195 segundos (18,35 km/h de velocidad media).

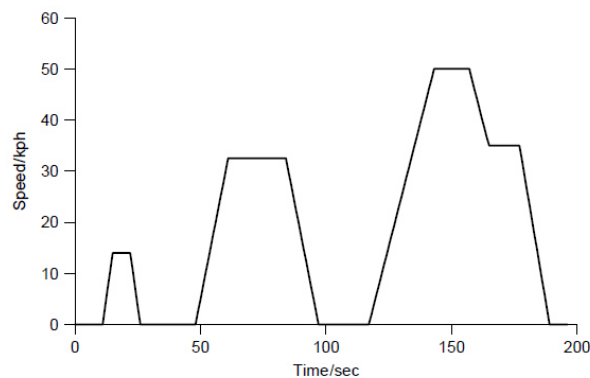


Figura 8.1 Ciclo urbano ECE-15 (fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

8.1 Análisis del ciclo

El siguiente esquema integra todas las partes vistas hasta ahora: el modelo dinámico, unido al circuito eléctrico (fuente de alimentación-convertidor-motor) a través del reductor, y todo ello gestionado por el controlador con conexión en bucle cerrado.

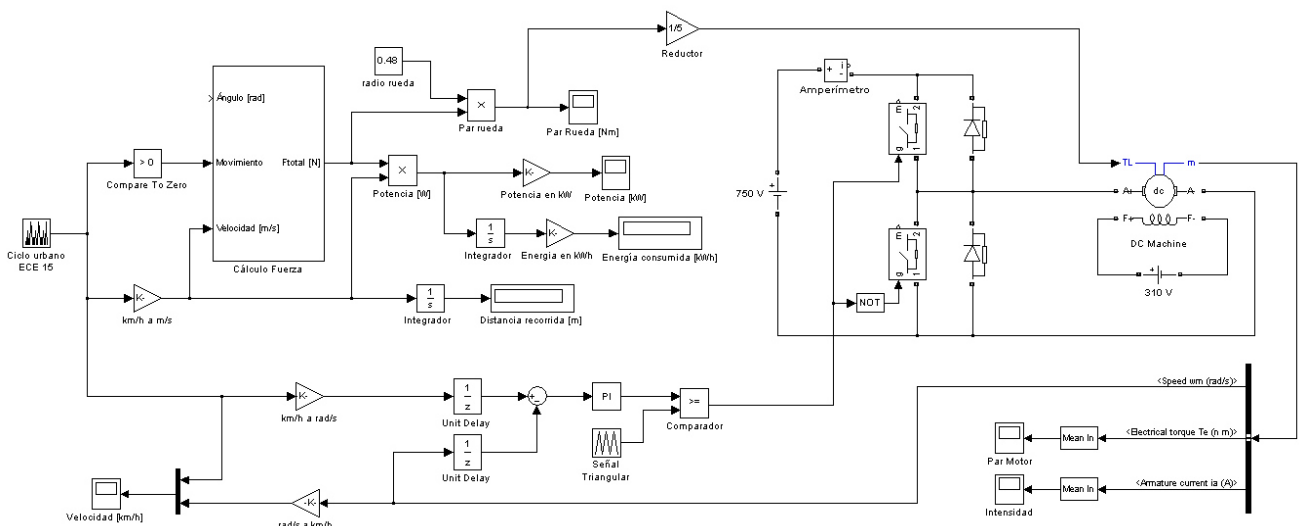


Figura 8.2 Modelo dinámico-eléctrico

Las dos entradas al controlador se realizan a través del bloque “Unit Delay”. Esto discretiza la señal antes de ser comparada, lo que produce una mejora de la simulación.

También puede apreciarse la parte denominada anteriormente como “Generador PWM”, formada por un generador de señal triangular y un comparador, que se encarga de generar los pulsos para el disparo de los interruptores del convertidor. Su funcionamiento se ilustra a continuación:

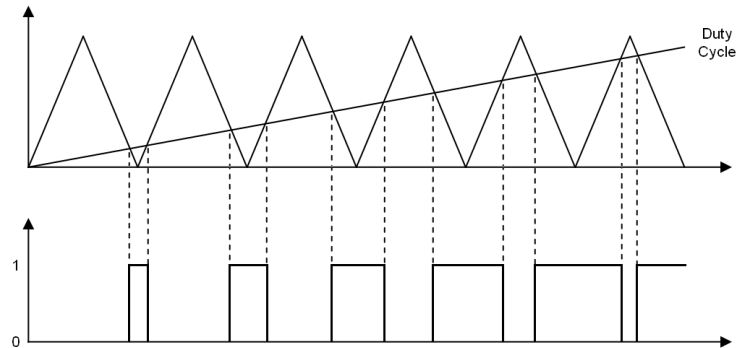
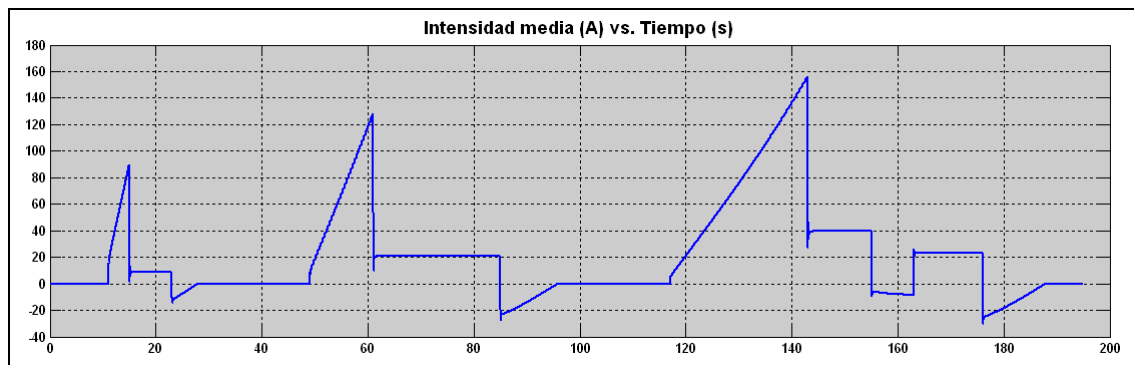


Figura 8.3 Funcionamiento del Generador PWM

Nótese además que se ha incrementado en 30 voltios la tensión que veníamos utilizando hasta el momento (se ha pasado de 720 a 750 voltios). Esto se hace para compensar la caída de tensión que se producirá debido a la resistencia interna de la batería.

El amperímetro situado en serie con la fuente de alimentación registra la intensidad media⁹ del ciclo ECE-15 para su posterior tratamiento.



Gráfica 8.1 Intensidad media del ciclo ECE-15

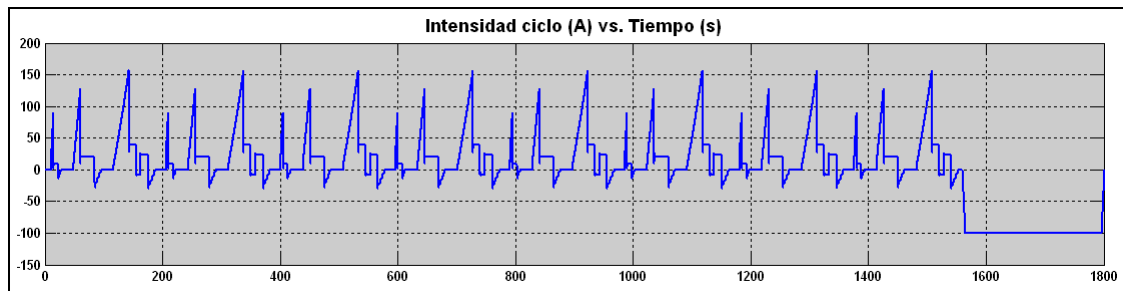
La energía consumida durante el ciclo ha sido 0,84 kWh. Utilizando el peso actualizado del vehículo que obtendremos en el apartado de conclusiones (13.467 kg) sale un consumo de 1,02 kWh. El fabricante BYD declara para su autobús eléctrico de 13.500 kg un consumo de 1 kWh/km, sin embargo en pruebas realizadas en circuito real el BYD dio un consumo de 1,25 kWh/km. Un estudio realizado en 2011 por la fundación CETENA para el Gobierno de Navarra cifró en 1,29 kWh/km el consumo del autobús eléctrico Foton cuyo recorrido discurría por las calles de Pamplona.

La diferencia entre el consumo obtenido en simulación frente al consumo real de los autobuses mencionados se debe en parte a que, por norma general, el ciclo ECE-15 es algo menos exigente que un ciclo real.

⁹ Tomar la intensidad media agiliza enormemente la simulación: recordar que la intensidad de este lado del convertidor es una curva pulsante (con una frecuencia cercana a 1 kHz, lo cual obligaría a tomar un tiempo de muestreo muy pequeño).

Además el modelo no considera los consumos causados por los distintos auxiliares de un autobús: climatizador, dirección asistida, iluminación, bomba del refrigerante, mecanismo de cierre de puertas, etc.

Un autobús realiza un número determinado de viajes durante su jornada de trabajo. Para simular este hecho se ha creado el siguiente ciclo, que representa la intensidad consumida por el autobús durante uno de los viajes.



Gráfica 8.2 Intensidad durante un ciclo de 30 minutos

La estructura de cada viaje está formada por un tramo de circulación de 26 minutos donde se ejecutarán sucesivos ciclos ECE-15 (8 en este caso), y un periodo de estacionamiento de 4 minutos al final de cada viaje, habitualmente utilizado por el conductor para tomar un descanso, y que se aprovechará para la recarga del autobús mediante un sistema de carga rápida.

8.2 Sistema de carga rápida de Volvo

Para la recarga de las baterías al final de cada viaje se ha tomado como referencia el sistema de carga rápida de Volvo. Este sistema fue probado en diciembre de 2014 utilizando un autobús híbrido en la ciudad alemana de Hamburgo y se espera que a lo largo de 2015 ocurra lo mismo en otras ciudades europeas.

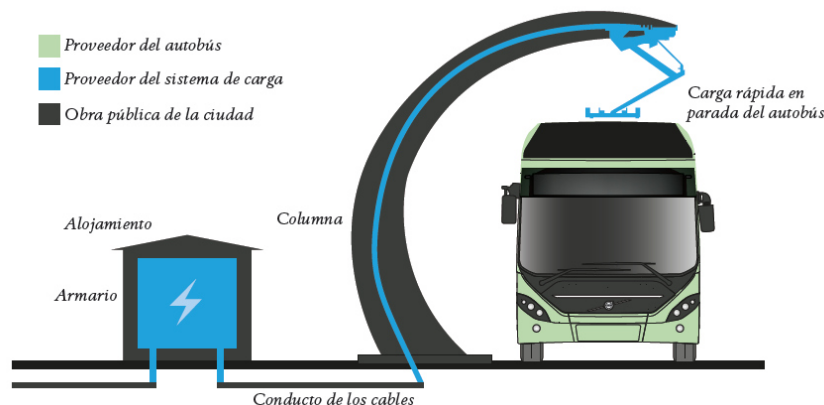


Figura 8.4 Esquema del sistema de carga rápida de Volvo (fuente: catálogo de Volvo)

La conexión se realiza por medio de un pantógrafo integrado en la columna de carga, evitando de esta manera la incorporación de partes móviles en el vehículo. Ofrece una salida en corriente continua a una tensión máxima de 750 voltios con un nivel máximo de potencia de 300 kW (400 amperios a 750 voltios).

9. Baterías

A continuación se indican tanto los parámetros que definen a una batería como los principales tipos de baterías utilizadas en vehículo eléctrico (también se incluyen las características de los supercondensadores).

9.1 Parámetros de las baterías

Tensión nominal de celda

Es uno de los parámetros fundamentales pues determina el número de celdas a colocar en serie hasta conseguir el nivel de tensión deseado. Su valor depende del tipo de batería, aunque suele estar entre 1 y 4 voltios.

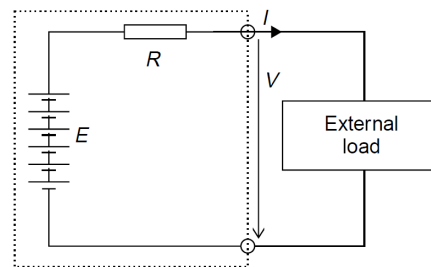


Figura 9.1 Circuito equivalente de una batería (fuente: *Electric Vehicle Technology Explained*)

Sin embargo la tensión aportada por una batería disminuye al conectar una carga, debido a la resistencia interna que presenta al paso de la corriente. Este hecho puede modelarse de forma simplificada con la siguiente expresión:

$$V = E - R \cdot I \quad (9.1)$$

donde E es el voltaje en vacío de la batería, que depende del estado de carga y de la temperatura entre otros.

Capacidad

Es la cantidad de carga contenida en la batería que podemos aprovechar para entregar corriente durante un cierto tiempo. Teóricamente, una batería de 100 Ah puede entregar una corriente de 10 A durante 10 h, o bien una corriente de 1 A durante 100 h. No obstante, la capacidad efectiva disminuye a medida que aumenta la corriente.

Energía

Expresada habitualmente en Wh, la energía es el producto de la tensión de la batería por su capacidad:

$$E = V \cdot Q \quad (9.2)$$

Estado de carga

El estado de carga (State Of Charge o SOC) indica mediante puntos porcentuales la cantidad de carga restante en una batería, siendo el 100% la carga al completo y el 0% la batería descargada.

Autodescarga

Es un proceso de descarga lenta y espontánea que sufren las baterías incluso si se encuentran desconectadas. La autodescarga aumenta proporcionalmente con la temperatura y el envejecimiento de la batería.

Efecto memoria

Es un fenómeno que se produce al cargar una batería que no ha sido completamente descargada. Tiene como consecuencia la reducción de la capacidad efectiva de la batería.

Vida útil

Se mide en número de ciclos de carga-descarga. Depende de las condiciones de uso, reduciéndose con la temperatura y al aumentar la intensidad de trabajo.

9.2 Tecnologías para el almacenamiento de la energía

Plomo-ácido (Pb-Ac)

La batería de plomo-ácido es comúnmente utilizada como batería de arranque en los vehículos de combustión actuales, aunque también se utilizó como batería de tracción en los primeros vehículos eléctricos, como fue el caso del General Motors EV1 del año 1996. Hoy en día se emplean baterías de tecnología más moderna para este propósito.

Características

- Tensión de celda: 2 voltios
- Baja energía específica: 35-50 Wh/kg
- Rendimiento: 70-85%
- Baja tasa de autodescarga: 5% al mes
- Vida útil: 500-1.000 ciclos
- Tecnología madura, fabricación simple y de bajo coste. Son reciclables
- Potencia relativamente alta, ideal para alimentar motores de arranque

Níquel-Cadmio (Ni-Cd)

Las baterías níquel-cadmio fueron consideradas como una gran alternativa a las baterías de plomo-ácido, sin embargo el cadmio es un elemento cancerígeno y muy contaminante, motivo que está provocando que este tipo de baterías caigan en desuso.

Características

- Tensión de celda: 1,2 voltios
- Energía específica: 50-60 Wh/kg
- Rendimiento: 70-90%
- Tasa de autodescarga: 10% al mes
- Vida útil: 1.000-1.500 ciclos
- Pueden trabajar en un amplio rango de temperaturas
- Son más caras que las baterías de plomo-ácido
- Presentan efecto memoria

Níquel-metal Hidruro (Ni-MH)

Aparecieron en el mercado a principios de la década de los 90 como alternativa a las baterías de Ni-Cd, pues tienen un funcionamiento similar con la ventaja de la sustitución del cadmio de su cátodo por un hidruro metálico. Las baterías de Ni-MH se utilizan actualmente el vehículo híbrido Toyota Prius.

Características

- Tensión de celda: 1,2 voltios
- Energía específica: 70-95 Wh/kg
- Rendimiento: 70%
- Alta tasa de autodescarga: 30% al mes
- Vida útil: 700-1.200 ciclos
- Presentan efecto memoria (aunque en menor medida que las de Ni-Cd)

Ión de Litio (Li-ion)

Aunque todavía sigue en la etapa de desarrollo, el aumento experimentado por esta tecnología, desde su primera aparición en 1991, ha hecho que sea considerada como la batería recargable más prometedora del futuro, ganando la aceptación de los fabricantes para su incorporación al mercado del vehículo eléctrico.

Características

- Tensión de celda: 3,2-3,8 voltios
- Energía específica elevada: 80-130 Wh/kg
- Rendimiento: 95%
- Tasa de autodescarga: 8% al mes
- Vida útil: más de 1.000 ciclos
- Necesidad de incorporar circuitos de protección
- No admiten descargas completas
- Elevado coste

Supercondensadores

El principio de funcionamiento de un supercondensador es distinto al de las baterías, las cuales desarrollan reacciones químicas que provocan la degradación progresiva de sus componentes. Los supercondensadores se caracterizan por ser capaces de ejecutar cargas y descargas de forma rápida, lo cual es ideal para vehículos eléctricos. Sin embargo su densidad energética es muy baja, por lo que siempre deben instalarse como sistema de apoyo a la batería.

Características

- Tensión: 2,7 voltios
- Alta potencia específica: 3 kW/kg
- Baja energía específica: 1-10 Wh/kg
- Rendimiento: 95%
- Vida útil: millones de ciclos
- Necesidad de incorporar circuitos de equilibrado de carga
- Elevado coste

9.3 Modelado de la batería

Con el siguiente esquema simularemos la descarga de la batería durante la jornada de trabajo del autobús¹⁰. El bloque “Repeating Sequence” toma el ciclo de intensidad de 30 minutos creado anteriormente y lo repite hasta 36 veces (haciendo un total de 18 horas).

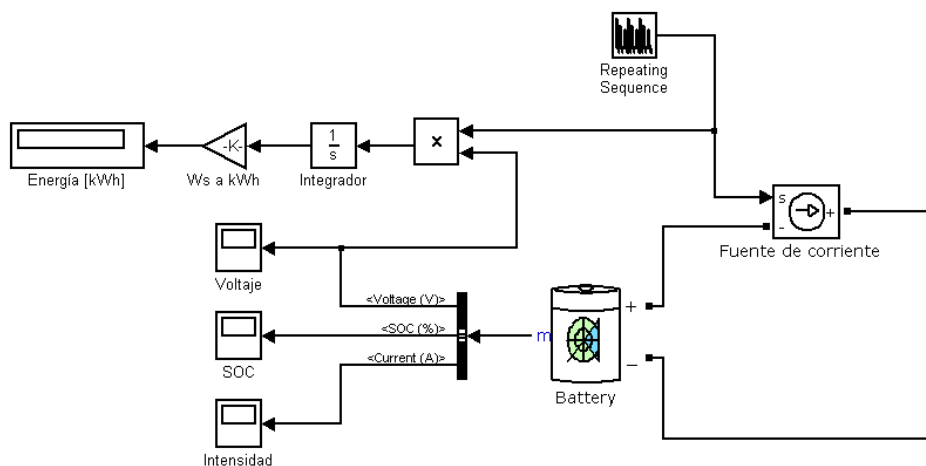


Figura 9.2 Esquema utilizado para simular la descarga de la batería

El modelo permite elegir entre uno de los siguientes tipos preestablecidos de batería: plomo-ácido, ión-litio, níquel-cadmio y níquel-metal hidruro; o bien uno a definir por parte del usuario. Los parámetros en detalle no pueden ser modificados al seleccionar un tipo de batería preestablecido.

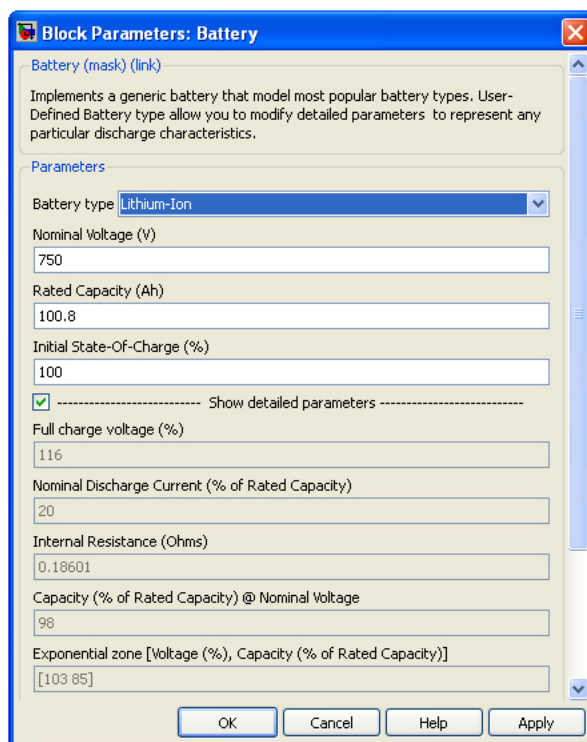


Figura 9.3 Parámetros de la batería

¹⁰ La jornada de trabajo de un autobús urbano en Zaragoza es de 18 horas.

MATLAB asegura haber validado experimentalmente su modelo, mostrando una desviación máxima del 5% (con SOC entre 10% y 100% e intensidades de carga hasta 2Q, y de descarga hasta 5Q)¹¹.

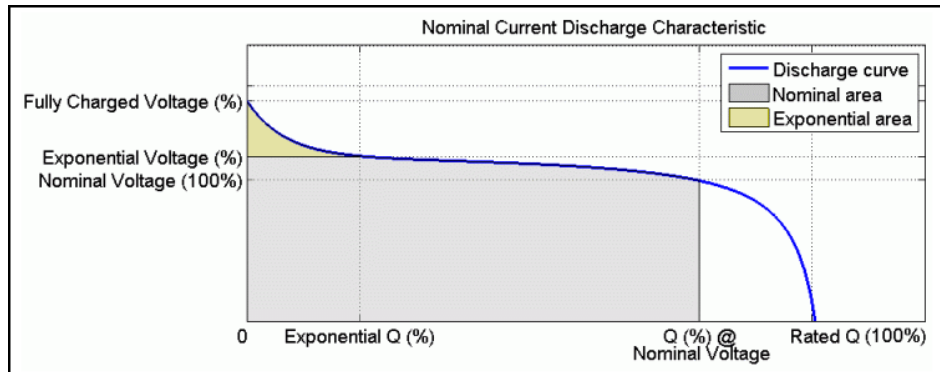


Figura 9.4 Interpretación de los parámetros de la batería (fuente: librería de MATLAB)

El resultado de la simulación habiendo utilizado una batería de ión-litio es el siguiente:

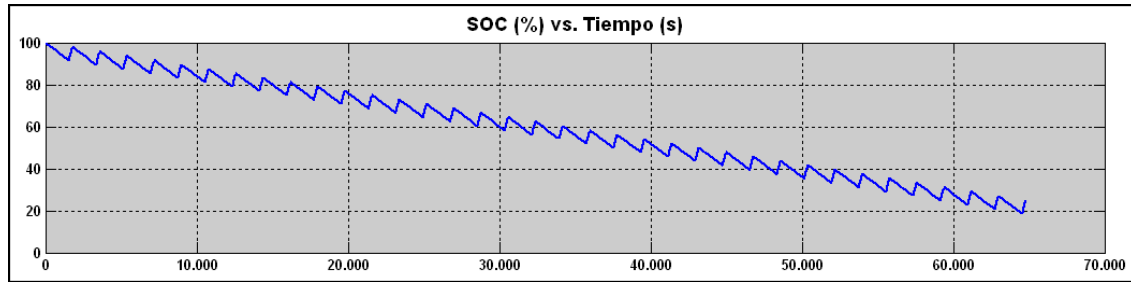


Figura 9.5 Estado de carga tras una jornada de trabajo de 18 horas (64.800 segundos)

Como puede observarse se ha dejado intencionadamente un margen del 20% sin descargar. Esta forma de trabajo evita el deterioro prematuro de la batería. Los cálculos para llegar a este resultado se han obtenido siguiendo la metodología que se explica a continuación.

9.4 Cálculo de la capacidad

El siguiente método nos permitirá hallar la cantidad óptima de baterías teniendo en cuenta que deben cumplirse dos condiciones:

- Disponer de autonomía suficiente para completar una jornada de trabajo.

$$E_1 = (E_{consumida} - E_{recargada}) \cdot n^{\circ}_{viajes} \quad (9.3)$$

- Disponer de una capacidad que permita la carga de la batería a un nivel determinado de intensidad. También será necesario establecer un margen por debajo del cual no podremos descargar la batería.

$$E_2 = (1 - SOC_{mínimo}) \cdot V \cdot Q \quad (9.4)$$

¹¹ Es habitual que los fabricantes expresen la intensidad máxima de carga (y de descarga) como un número n de veces la capacidad de la batería. A este parámetro se le denomina constante de carga.

Incorporando parámetros habituales, las ecuaciones quedan del siguiente modo:

$$E_1 = \left(1.250 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} \cdot 8 \text{ km} - 750 \text{ V} \cdot I(A) \cdot 4 \text{ min} \frac{h}{60 \text{ min}} \right) \cdot 36 \quad (9.5)$$

$$E_2 = 0,8 \cdot 750 \text{ V} \cdot Q(\text{Ah}) \quad (9.6)$$

Utilizaremos 1,25 kWh/km como consumo medio representativo del entorno urbano en base a lo expuesto en el capítulo número 8. Se ha considerado una jornada de 18 horas recorriendo el ciclo de 30 minutos mostrado anteriormente (36 viajes). Durante un viaje se recorren aproximadamente 8 km y el tiempo de carga en parada es de 4 minutos. El margen dejado para la batería ha sido del 20%.

Las dos ecuaciones anteriores representan dos rectas cuya intersección indica la capacidad mínima necesaria.

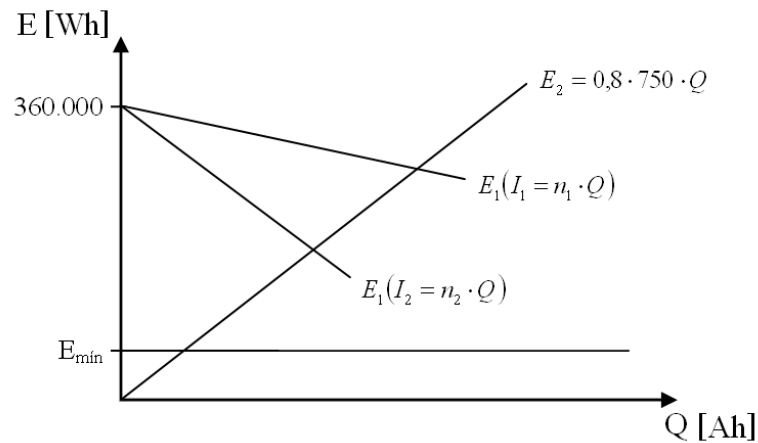


Figura 9.6 Representación gráfica de las ecuaciones

Iguando ambas ecuaciones

$$E_1 = E_2 \quad (9.7)$$

$$360.000 - 1.800 \cdot I = 0,8 \cdot 750 \cdot Q \rightarrow Q = \frac{360.000}{1.800n + 0,8 \cdot 750} \quad (9.8)$$

donde la intensidad de carga se ha dejado en función de n para poder considerar baterías de diferente constante de carga.

A partir de aquí podemos estudiar cual será la cantidad de baterías necesaria y plantear diferentes escenarios de funcionamiento. Para conseguir un resultado lo más realista posible utilizaremos las especificaciones de la batería Calb modelo CAM72F. Esta batería nos permite realizar la carga a una intensidad de 1Q.

9.5 Batería Calb CAM72F

Calb es una empresa china especializada en la fabricación de baterías para vehículo eléctrico y energías renovables. En su catálogo podemos encontrar el modelo CAM72F, una batería de litio-ferrofosfato con encapsulado de aluminio, lo cual le concede una alta densidad energética (121 Wh/kg).

Además su diseño está pensado configurar un pack de baterías de forma modular, es decir, conectando tantos módulos en serie-paralelo como sea necesario, hasta cumplir los requisitos de voltaje e intensidad de cada caso. Su precio esta en torno a \$139, por lo que el precio del kWh se sitúa en \$603.

Capacity	72 Ah	
Voltage	3.2 V nom	
Cycle Life	≥2000 Cycles	
Internal Resistance	≤1mΩ	
Charging(Constant Current-Constant Voltage)	Maximum Constant Charging Current	72A
	CC To CV Voltage	3.65V
Discharging	Maximum Constant Discharging Current	144A
	Discharging Cut-off Voltage	2.5V
	Pulse Discharge	576A@10s 288A@30s
Weight	1.9±0.1kg	
Dimensions	135 L×29 W×222H mm	
Charging Temperature	0~45 °C	
Discharging Temperature	-20~50 °C	
Shell Material	Aluminum alloy	




Figura 9.7 Especificaciones de la batería Calb modelo CAM72F (fuente: catálogo de Calb)

Los cálculos nos dan como resultado una capacidad de 150 Ah. Conectando dos ramas en paralelo de 235 módulos CAM72F por rama conseguiríamos un voltaje de 752 voltios y 144 Ah. En voltaje cumplimos el requisito, sin embargo la capacidad nos queda un poco por debajo. Puesto que la diferencia es pequeña, quizás podríamos forzar la batería cargándola a una intensidad superior a la recomendada por el fabricante:

$$144 = \frac{360.000}{1.800n + 0,8 \cdot 750} \rightarrow n = 1,05 \rightarrow I = 1,05 \cdot Q = 152A \quad (9.9)$$

Dando este resultado por bueno, el pack final de baterías estaría compuesto por 470 módulos CAM72F con un peso de 1,9 kg por módulo, haciendo un total de 893 kg.

9.6 Otros casos estudiados

➤ Si no cargamos baterías

Si relajásemos la jornada sin cargar baterías sería necesario embarcar toda la energía consumida durante los viajes más la reserva del 20% que debe quedar sin descargar. Utilizando la densidad energética de 121 Wh/kg tenemos:

$$E = \frac{360.000}{0,8} = 450.000Wh \rightarrow 3.719kg \quad (9.10)$$

- Si quisiéramos utilizar la energía mínima

Esto supondría recargar la batería al completo durante la parada, embarcando únicamente la energía necesaria para realizar un viaje (más el correspondiente margen del 20%).

$$E_{consumida} = E_{recargada} \rightarrow I = 12Q \quad (9.11)$$

Este caso requeriría una batería capaz de resistir intensidades de carga de 12Q.

- Utilizar dos autobuses (obviando el tema de inversión que ello supone)

$$Q = \frac{180.000}{900 + 0,8 \cdot 750} = 120Ah \rightarrow E = 90kWh \rightarrow 743,8kg \quad (9.12)$$

Cada uno haría la mitad de la jornada (18 viajes). Podría pensarse que cada autobús necesitaría portar exactamente la mitad de energía del primer caso, sin embargo el resultado final indica que son necesarios 743,8 kg, escasa mejora con respecto a los 893 kg que llevaría un solo autobús.

- Si solo pudiéramos disponer de un cargador al inicio (o al final) del viaje

$$Q = \frac{360.000}{900 + 0,8 \cdot 750} = 240Ah \rightarrow E = 180kWh \rightarrow 1.487,6kg \quad (9.13)$$

- Si el consumo fuese de 1,5 kWh/km

$$Q = \frac{432.000}{1.800 + 0,8 \cdot 750} = 180Ah \rightarrow E = 135kWh \rightarrow 1.115,7kg \quad (9.14)$$

- Si las baterías nos permitiesen realizar la carga a 2Q

$$Q = \frac{360.000}{1.800 \cdot 2 + 0,8 \cdot 750} = 85,7Ah \rightarrow E = 64,3kWh \rightarrow 531,3kg \quad (9.15)$$

10. Conclusiones

Considerando como habitual el funcionamiento de un autobús urbano descrito en la sección anterior (un determinado número de viajes por jornada, con una frecuencia media de 30 minutos y descansos al final del trayecto), hemos determinado que se necesitan 893 kg de baterías, lo que supone un coste de en torno a 65.330 dólares (utilizando el precio de los módulos CAM72F).

Si el motor Mercedes-Benz OM 906 hLA consume una media de 42,4 litros a los 100 kilómetros y un autobús recorre 288 kilómetros por jornada, el cambio a la tracción eléctrica permitiría un ahorro diario de 122 litros de combustible, evitando además la emisión de contaminantes que ello conlleva.

Para finalizar se calculará la pendiente máxima superable por un Mercedes-Benz Citaro “convertido” a modo eléctrico (se sustituye el sistema de propulsión del Mercedes-Benz Citaro por un sistema de propulsión eléctrico, formado por los componentes vistos¹²):

- Combustión: motor – caja de cambios – depósito de combustible¹³
- Eléctrico: motor eléctrico – reductor – pack de baterías

Se ha supuesto además que todos los asientos del autobús (28 asientos) están ocupados por una persona (peso medio por persona: 70 kilogramos).

Nuevo peso del autobús

$$m = m_{\text{autobús}} - m_{\text{combustión}} + m_{\text{eléctrico}} + m_{\text{personas}} \quad (10.1)$$

$$m = 10.950 - (800 + 348 + 280 \cdot 0,85) + (840 + 210 + 893) + 28 \cdot 70 = 13.467 \text{ kg} \quad (10.2)$$

El cálculo lo realizaremos en base al par proporcionado por el motor. Se supone que el ascenso de la pendiente se lleva a cabo a bajas velocidades y sin aceleraciones bruscas (es decir, no se tendrán en cuenta los efectos de la resistencia aerodinámica ni de la resistencia por inercia). El par nominal del motor Siemens es de 1.110 Nm:

$$F_{\text{rueda}} = \frac{M_{\text{rueda}}}{r} = \frac{M_{\text{motor}} \cdot G}{r} = \frac{1.110 \cdot 5}{0,48} = 11.562,5 \text{ N} \quad (10.3)$$

$$F_{\text{rueda}} = F_{\text{rodadura}} + F_{\text{pendiente}} = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha \quad (10.4)$$

$$11.562,5 = 0,013 \cdot 13.467 \cdot 9,81 + 13.467 \cdot 9,81 \cdot \text{sen} \alpha \rightarrow \alpha = 4,27 \quad (10.5)$$

$$\text{pendiente} = 100 \cdot \text{tg}(4,27) = 7,47\% \quad (10.6)$$

Podremos sobrecargar el motor con un par máximo de 1.776 Nm durante 15 segundos, pudiendo superar en este caso pendientes de hasta el 12,8%. En rutas donde existan pendientes superiores (o sea necesario transportar a un mayor número de gente) habrá que instalar un motor de par superior.

¹² Tener en cuenta que el motor-reductor de un autobús fabricado para ser eléctrico está específicamente diseñado para este fin, mientras que nosotros hemos utilizado componentes comerciales multipropósito.

¹³ En realidad el peso del depósito no es constante puesto que el combustible se va consumiendo.

Datos: capacidad del depósito = 280 litros, densidad del diesel = 0,85 kg/litro

Bibliografía

- BOUZADA, P.; MARTINELLI, G. y CILLERO, A. *Consumos de energía y emisiones asociados al transporte por autobús y autocar*. Monografía nº13. EnerTrans, 2008.
- DOMÍNGUEZ, E. J. y FERRER, J. *Sistemas de transmisión y frenado*. Editex, 2012.
- EHSANI, M.; GAO, Y. y EMADI, A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press, 2010 (2.ª edición).
- FULLEA, J. et al. *El vehículo eléctrico: tecnología, desarrollo y perspectiva*. McGraw-Hill, 1997.
- GRUNDITZ, E. y JANSSON, E. *Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart*. Chalmers University of Technology. Gotemburgo, 2008.
- HUGHES, A. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Newnes, 2006 (3.ª edición).
- LARMINIE, J. y LOWRY J. *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, 2003.

Otras fuentes consultadas

Librerías de MATLAB Simulink

<http://es.mathworks.com/help/physmod/sps/specialized-technology.html>

Noticias online

<http://www.motorpasionfuturo.com>

<http://www.movilidadelectrica.com>

Catálogos

Mercedes-Benz Citaro

http://www.revistaviajeros.com/galerias/2/citaro2_ficha_tecnica.pdf

Transmisión ZF Ecolife

http://www.zf.com/na/content/media/mexico/corporate_mx/EcoLife.pdf

Reductores Tramec

http://www.tramec.it/System/11318/03_Z_IT-EN-DE_140402_WEB.pdf

Motores c.c Siemens

<http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/ld/Documentsu20Catalogs/dc-motor/da12-2008-en.pdf>

Módulo IGBT HiPak 5SNE de ABB

https://library.e.abb.com/public/388c9b97a611b43d83257cdd002c495d/5SNE%200800M170100_5SYA1590-01Apr%2014.pdf

Sistema de carga rápida de Volvo

http://electricityhybrid.volvobuses.com/pdf/Opportunity_Charging_System_FS_ES.pdf

Batería Calb CAM72F

<http://evwest.com/support/CAM72FI%20Final.pdf>